INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ENERGÍA
El futuro del sector eólico

FÍSICA
Gravedad cuántica en Planilandia

SOSTENIBILIDAD
Viabilidad ecológica de las economías

El antepasado de *Homo*

Nuevos hallazgos fósiles arrojan luz sobre el origen de nuestro linaje

INFORME ESPECIAL
Un siglo de lucha contra la polio

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL ANTEPASADO DE *HOMO* | FUTURO DEL SECTOR EÓLICO | GRAVEDAD EN PLANILANDIA

N.° 429

JUNIO 2012



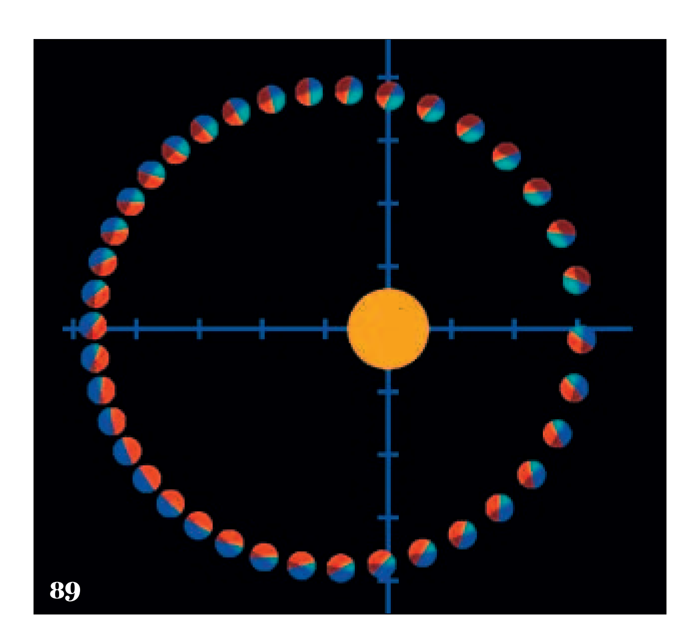
6,50 EUROS



ANDREW HETHERINGTON


6


36


89

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Unos fósiles descubiertos hace poco en Sudáfrica corresponden a una nueva especie, *Australopithecus sediba*, que podría ser el antepasado de nuestro género, *Homo*. El cráneo forma parte de un esqueleto muy bien conservado de un macho joven que, junto a otros individuos, pereció en una cueva subterránea hace 1,977 millones de años cerca de la actual ciudad de Johannesburgo. Fotografía de Brent Stirton, Getty Images.

redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2012

ADIVINAR EL FUTURO

Por muy interesantes que parezcan las conjeturas de David Weinberger en «Simular el planeta en tiempo real» [Investigación y Ciencia, febrero de 2012] sobre la capacidad de predicción de los modelos que emplean grandes cantidades de datos, los planificadores y científicos sociales no estarán dispuestos a quedarse al margen. El sistema informático de inteligencia artificial Watson de IBM, por ejemplo, despliega una enorme potencia de cálculo cuando se le formula una pregunta clara, pero las cuestiones sociales de importancia raras veces lo son. En un futuro próximo un superordenador no acertará a resolver con éxito, mediante respuestas complejas, las sencillas cuestiones que preocupan a las sociedades modernas. ¿Cómo motivar a los Gobiernos asiáticos para que se comprometan frente al cambio climático? ¿De qué manera combatir la pobreza? ¿Cómo lograr que los usuarios renuncien a su automóvil en favor del transporte público?

Hoy, el reto al que se enfrenta la capacidad de predicción pasa por integrar con éxito la filosofía y las ciencias sociales y conductuales junto con las ciencias físicas y la ingeniería. Véase el fracaso de los climatólogos para lograr avances en sus propuestas para combatir el cambio climático, algo que en parte puede achacarse a haber prescindido de sociólogos, conductistas y políticos. Si partiéramos de una cooperación multidisciplinar, los superordenadores tal vez contarían con más medios para predecir el futuro.

David R. Hardy
Toronto

Considero que el trabajo del físico Dirk Helbing, que Weinberger describe como el intento de crear «un ordenador que funcionase a modo de bola de cristal mundial», tropieza con una barrera infranqueable: la arquitectura discreta del mundo natural. Helbing ha trabajado con modelos de tráfico rodado, cuya arquitectura básica es lineal. La circulación de vehículos guarda semejanza con un flujo hidráulico en el que las partículas discurren de forma continua. Soy experto en tráfico ferroviario, el cual no podría comportarse de un modo más distinto. En casi todos los niveles, las opciones y los costes son de naturaleza discreta: estos quedan representados por funciones escalón irregulares, muy correlacionadas y dinámicamente inestables. Todo ello imposibilita el empleo de modelos de tráfico rodado u otros de tipo lineal —por más que haya quien lo intente.

La arquitectura matemática del mundo ¿se parece a una red de carreteras o a una ferroviaria? En este último caso, predecir el futuro se antoja imposible, pues el mundo estaría gobernado por sucesos discretos, algunos de ellos del tipo «cisne negro». Como afirma una de las frases atribuidas a Benoît Mandelbrot: «Aunque la economía sea una disciplina muy antigua, no ha llegado a dominar por completo su mayor dificultad: la excesiva importancia práctica de ciertos sucesos extremos». En el mundo natural, de hecho, Dios juega a los dados.

Tom Erikson
Wallingford, Pensilvania

BOSQUES INTELIGENTES

El articulo «Los terpenos de las plantas» de Elena Ormeño y Catherine Fernández [Investigación y Ciencia, mayo de 2012] me ha llevado a considerar la tremenda similitud funcional que parece existir entre estas moléculas y las feromonas animales. Si en una colonia de hormigas la información mediada por feromonas consigue producir un comportamiento emergente en toda la colonia al que podríamos denominar «inteligencia del hormiguero», ¿no podríamos pensar en una «inteligencia del bosque» mediada por terpenos?

Juan A. Pérez Esquiva
Cartagena

Responde Ormeño: *Existe efectivamente una gran similitud entre los terpenos de las plantas y las feromonas del reino animal. Ambos son compuestos volátiles emitidos por seres vivos que pueden ser percibidos tanto por un individuo de la misma especie como por los pertenecientes a otra. Sin embargo, a diferencia de las feromonas animales y las fitohormonas (hormonas vegetales) como las auxinas o el etileno, los terpenos volátiles no poseen una función universal. Es muy probable que los terpenos volátiles que desempeñan una función en una red trófica (planta-insecto-herbívoro, por ejemplo), no ejerzan ningún papel en otra red trófica integrada por especies diferentes. A pesar de ello, puede sin duda hablarse de una «inteligencia del bosque» mediada por terpenos.*



Mayo 2012

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Erratum corrige

Como nos indica el lector Fernando Llavador Colomer, en la ilustración del artículo «Retazos de biosfera», del pasado mes de mayo, se hallan intercambiados los rotulados correspondientes a las zonas aerobia y anaerobia. La zona aerobia es la superior y la anaerobia, la inferior.

Apuntes

PLANETAS

¿Tuvo Marte un océano en el pasado?

A juzgar por el aspecto que presenta el hemisferio norte del planeta rojo, no son pocos los expertos que creen que en el pasado debió de existir allí un océano. Ahora, la sonda europea *Mars Express*, que orbita en torno a Marte desde 2003, parece haber hallado pruebas a favor de dicha hipótesis. MARSIS, el radar de a bordo de la nave, ha obtenido datos que parecen corresponderse con la presencia de restos sedimentarios en el hemisferio septentrional del planeta. Según un estudio publicado el pasado mes de enero en *Geophysical Research Letters*, dichos sedimentos, que tal vez se hallen mezclados con hielo, podrían haber sido depositados por las aguas de un océano poco profundo que habría bañado el suelo marciano hace unos tres mil millones de años.

Según Jérémie Mouginot, geofísico de la Universidad de California en Irvine y autor principal de la investigación, los datos de la misión han permitido completar un mapa de la intensidad de los ecos del radar sobre toda la superficie del planeta. En la formación Vastitas Borealis (un depósito geológico cercano al polo norte marciano, sobre cuyo posible origen sedimentario los expertos sospechan desde hace tiempo) la reflectividad de las ondas del radar resultó ser muy baja, más de lo que cabría esperar si se tratase de una formación volcánica. La interpretación de Mouginot concuerda con los datos obtenidos hace unos años por la sonda *Mars Reconnaissance Orbiter*, de la NASA.

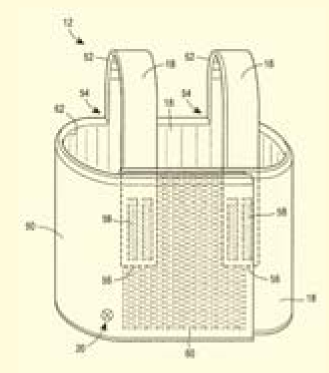
A la vista de la extensión de la supuesta capa sedimentaria, el antiguo océano habría ocupado una región considerable, aunque no durante largo tiempo. Hace unos tres mil millones de años, la actividad geotérmica de Marte habría bastado para fundir un gran volumen de aguas freáticas. Mouginot, que no descarta la existencia de otro océano más antiguo, cree que un episodio de inundación puntual pudo haber dejado la llanura sumergida a unos cien metros de profundidad. Sin embargo, el clima marciano de entonces habría sido demasiado seco y frío como para mantener toda esa masa de agua durante una escala de tiempo geológica. El océano habría desaparecido en torno a un millón de años después, ya fuese por evaporación o tras volver a congelarse y ser enterrado de nuevo.

Aunque los nuevos datos parecen apoyar la hipótesis de un antiguo océano, las pruebas están aún lejos de ser concluyentes. En opinión de Norbert Schörghofer, planetólogo del Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawái en Manoa, que no tomó parte en la investigación, verificar dicha posibilidad llevará tiempo. También cabe preguntarse por otras interpretaciones de los datos obtenidos por el radar, ya que este método no proporciona sino un diagnóstico impreciso sobre la composición del suelo. En cualquier caso, «es un dato más que apoya la existencia de un océano pasado», concluye Schörghofer.

—John Matson

PATENTES

Sistema propioceptivo: Cuando Hilary Mass tenía ocho años, su familia aumentó por la llegada de un nuevo miembro que le cambiaría la vida: un hermano pequeño con necesidades especiales. Al ser la hija mayor, Mass se convirtió en su cuidadora. Supo entonces que se dedicaría a ello.



Durante los últimos 30 años, ha trabajado con niños con necesidades especiales. Muchos de ellos siguen lo que los especialistas denominan «dietas sensoriales», actividades destinadas a satisfacer sus particulares necesidades de estimulación. A algunos niños autistas, por ejemplo, les gusta ser abrazados o sentir una suave presión sobre los hombros, ya que esa sensación los relaja y de esa manera pueden controlar mejor su ansiedad o hiperactividad. A tal fin existen chalecos especiales, provistos de bolsas de arena que ejercen esa ligera presión corporal. Sin embargo, a muchos de los pequeños con los que trabajaba Mass no les agradaba llevar puestos esos chalecos tan voluminosos. «No se lo ponían por sí mismos. Tenías que convencerlos u obligarlos», explica Mass.

Mass comenzó hace unos siete años a desarrollar su propio traje. El resultado, bautizado como Big Hug («gran abrazo») y descrito en la licencia número 8.095.994 de la Oficina de Patentes de EE.UU., es un chaleco que los niños pueden llevar puesto como si se tratase de una prenda más. El diseño de Mass no emplea bolsas de arena ni otros pesos, sino que consiste en una indumentaria hinchable que permite ejercer presiones regulares y adaptables sobre diversas partes del cuerpo.

Aunque por el momento solo lo ha probado con sus niños, el invento ha demostrado tener éxito. A los pequeños parece gustarles y, de hecho, lo piden. Mass intenta ahora comercializar la idea, que cree que podría ayudar a mejorar el día a día de numerosas familias.

—Rose Eveleth

IMAGEN PROCESADA POR JODZ SWANN, TAMMY BECKER Y ALFRED MCEWEN A PARTIR DEL SISTEMA DE CARTOGRAFÍA PLANETARIA DESARROLLADO POR EL SERVICIO DE INSPECCIÓN GEOLÓGICA DE LOS EE.UU. EN FLAGSTAFF (*mapa de Marte*); OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. (*chaleco*)

MEDIOAMBIENTE

Cianobacterias y calentamiento global

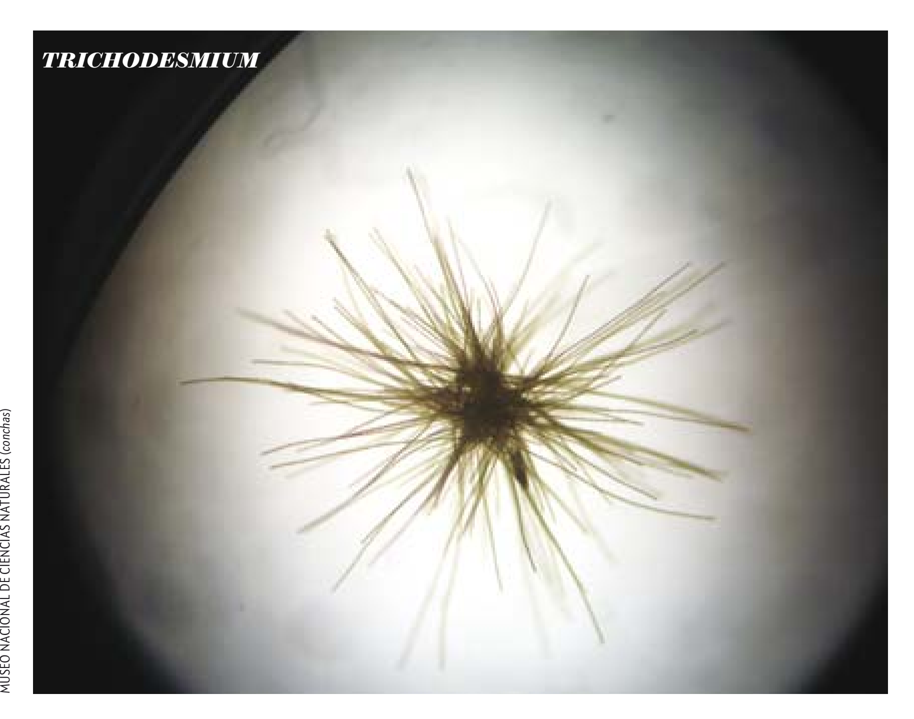
Las cianobacterias no son más que pequeños organismos fotosintéticos que flotan en las aguas marinas. Sin embargo, cuando se unen entre sí en cadenas y luego en grandes superficies de millones y millones de bacterias pueden convertirse en una amenaza. Antes de que pase mucho tiempo, los microorganismos cambian el color de la superficie marina e incluso amortiguan el oleaje causado por el viento. Un estudio de las cianobacterias, también conocidas como algas verdeazuladas a pesar de que no son algas, predijo que las temperaturas crecientes de los mares podrían ayudar a que esos microorganismos, que ya ocupan enormes extensiones, ampliasen su territorio en más de un diez por ciento. Se plantea ahora la pregunta de si las grandes proliferaciones de cianobacterias podrían modificar las temperaturas marinas locales, con lo que se crearía un fuerte ciclo de realimentación.

Las cianobacterias se hallan por todas partes. Expulsan suficiente oxígeno a la atmósfera como para determinar la mezcla de gases que respiramos. También compiten con gran éxito por los nutrientes, entre ellos el nitrógeno y el fósforo. La proliferación de las cianobacterias se produce a menudo a costa de especies vecinas, como los peces y otros organismos del fitoplancton. Por tanto, si esas bacterias están alterando la temperatura de una superficie cada vez mayor de los océanos y están ganándoles terreno a los seres de aguas más frías, cabe preguntarse sobre el modo en que lo están haciendo y las consecuencias que acarreará tal proceso, afirma Sebastian Sonntag, climatólogo de la Universidad de Hamburgo.

Sonntag y sus colaboradores han adaptado un modelo informático que describe la mezcla de capas de agua marina para tener en cuenta dos tipos de cambios producidos por la cianobacteria *Trichodesmium*: una mayor absorción de luz y una menor agitación de las aguas. El modelo predijo un calentamiento de la superficie marina de hasta dos grados centígrados, debido a la absorción de luz. Aparentemente, el menor oleaje afectaba las temperaturas locales en un grado centígrado.

Podría tratarse del primer estudio de este tipo sobre floraciones algales en el océano, afirma Jef Huisman, experto en microbiología acuática de la Universidad de Ámsterdam, que ha estudiado la absorción de luz por las cianobacterias en lagos. Tanto Sonntag como Huisman afirman que les gustaría que los oceanógrafos midieran la temperatura del agua marina en lugares donde proliferan las cianobacterias y en zonas contiguas carentes de ellas para comprobar las predicciones del nuevo modelo y mejorar versiones futuras.

—Lucas Laursen



TRICHODESMIUM

CORTESÍA DE ELIZABETH C. SARGENT, UNIVERSIDAD DE SOUTHAMPTON Y CENTRO NACIONAL DE OCEANOGRAFÍA, SOUTHAMPTON (*Trichodesmium*)
MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES (*conchas*)

AGENDA

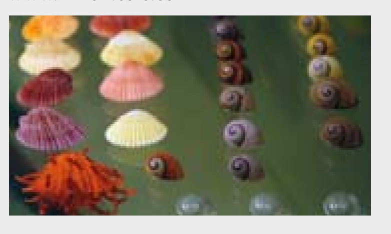
CONFERENCIAS

13 de junio
La carrera al Polo Sur. La última gran aventura científica
Javier Cacho Gómez, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Valencia
www.cac.es/acienciacierta

27 de junio
¿Universo o multiverso?
Andrei Linde, Universidad Standford
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es

EXPOSICIONES

Biodiversidad
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



Darwin según Darwin
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

OTROS

8 y 9 de junio - Congreso
Debate sobre arqueología del paisaje o espacial
Universidad de Cantabria
Santander
www.spatialarchaeology.unican.es

9 y 10 de junio - Curso
Las mariposas mediterráneas
Museo de las Tierras del Ebro
Amposta
ichn.iec.cat/pdf/CCNN_2012.pdf

Del 11 al 15 de junio
Campus Nobel Cantabria 2012
Palacio de la Magdalena
Santander
www.cantabriacampusinternacional.com

Del 1 al 4 de julio
Campus Nobel Cataluña Sur: Química para la vida
Centro de Convenciones de Portaventura
Tarragona
www.ceics.eu/nobel-campus

LINGÜÍSTICA

No por hablar más rápido comunicamos más



En 1998, el lingüista Peter Roach escribió: «Los hablantes de algunas lenguas parecen parlotear muy rápido, como metralletas; otros idiomas, en cambio, suenan más lentos y pesados». Hace unos meses, un grupo de lingüistas intentó cuantificar la observación de Roach. François Pellegrino y sus colaboradores de la Universidad de Lyon publicaron en la revista *Language* un artículo en el que analizaban el discurso de 59 sujetos, los cuales leyeron en voz alta los mismos 20 textos en 7 idiomas. Hallaron que en japonés y en español, idiomas que suelen describirse como «rápidos», se pronunciaba el mayor número de sílabas por segundo. El idioma «más lento» fue el chino mandarín, seguido de cerca por el alemán.

Pero la historia no acaba aquí. Los investigadores calcularon la densidad de información por sílaba en cada uno de los siete idiomas, para lo cual los compararon con un octavo, el vietnamita, que emplearon como referencia. Sus resultados indican que, en promedio, una sílaba en castellano contribuye solo a una pequeña fracción del significado total de la frase. En cambio, una sílaba en chino mandarín parece codificar una mayor cantidad de información, probablemente debido al carácter tonal de dicha lengua. El resultado final no deja de causar cierta sorpresa: un hablante de español y otro de mandarín transmiten a sus oyentes la misma cantidad de información por unidad de tiempo, una cifra que se mostró casi idéntica en cinco de los siete idiomas analizados. Los autores conjeturan que, a pesar de la enorme diversidad de las lenguas habladas en el mundo, puede que todas ellas comuniquen información a velocidades muy similares, un fenómeno que tal vez guarde relación con las capacidades de percepción humanas.

IDIOMA	SÍLABAS POR SEGUNDO
Japonés	7,84 (± 0,09)
Castellano	7,82 (± 0,16)
Francés	7,18 (± 0,12)
Italiano	6,99 (± 0,23)
Inglés	6,19 (± 0,16)
Alemán	5,97 (± 0,19)
Vietnamita	5,22 (± 0,08)
Chino mandarín	5,18 (± 0,15)

En los años sesenta, Noam Chomsky postuló la existencia de una gramática universal, una hipótesis según la cual todos los idiomas compartirían una serie de estructuras abstractas comunes. La propuesta de Chomsky ha fascinado desde entonces a un buen número de lingüistas, pero en la práctica siempre ha resultado difícil identificar y caracterizar dichas estructuras comunes. La investigación de Pellegrino y sus colaboradores sugiere que, con independencia de los recursos que usen, los diferentes idiomas se hallarían organizados de tal manera que asegurarían un flujo regular de información del hablante al oyente.

—Anne Pycha

¿QUÉ ES ESTO?

Visión en verde: Hace tiempo que los científicos se preguntan por la forma en la que los saltícidos, o arañas saltadoras, obtienen información visual con la rapidez y precisión suficientes como para atrapar moscas. En un estudio publicado en la revista *Science* en enero, Takashi Nagata, de la Universidad de la Ciudad de Osaka, y sus colaboradores señalaban que esas arañas comparan imágenes enfocadas y desenfocadas para percibir la profundidad, pero con un toque de color. Se sabía que las dos capas más profundas de los dos ojos principales de un saltícido (*los de mayor tamaño en la imagen*) se hallaban sintonizadas para percibir la luz verde. Sin embargo, parece que la enfocan de forma diferente: la capa más profunda enfoca con claridad la luz verde, mientras que la segunda recibe imágenes desenfocadas. Para comprobar si las diferencias entre ambas capas resultaban importantes para la percepción de la profundidad, el equipo de Nagata tentó a las arañas con sabrosas moscas, iluminadas con luz verde. Los animales saltaron con precisión sobre su objetivo. En cambio, cuando la presa se iluminaba con luz roja que no contenía longitudes de onda verde, las arañas fallaban el salto una y otra vez.

—Katherine Harmon



THOMAS FUCHS (*ilustración*); YUKIO NANBA, MINDEN PICTURES (*araña*)

INGENIERÍA

Empezando por la cola



La ciencia ficción a menudo imagina mundos poblados por robots humanoides. En realidad, los insectos, reptiles y otros animales suelen constituir un ejemplo más práctico para los autómatas: cuantas más patas tiene un robot, más fácilmente puede desplazarse por terrenos abruptos; las zarpas son más fáciles de imitar que las manos de los primates, y las colas constituyen un mecanismo de estabilización muy versátil.

La parte trasera del cuerpo de las serpientes, hormigas o incluso saltamontes ha servido como inspiración para diversos expertos en robótica. Robert J. Full, de la Universidad de California en Berkeley, y sus colaboradores se han centrado en el lagarto agama común de África. Su trabajo, publicado en el número del 12 de enero de la revista *Nature*, describe cómo el estudio de la forma en la que estos reptiles saltan sobre superficies resbaladizas ha permitido mejorar el diseño robótico.

La grabación en vídeo de alta velocidad de escenas de movimiento reveló que el lagarto agama, al saltar desde un bloque plano y rectangular hasta una superficie vertical, alza su cola para contrarrestar la falta de agarre en esa superficie resbaladiza. Cuando el bloque se cubría con papel de lija, el lagarto necesitaba menor estabilización y mantenía su cola encogida durante el salto.

Los científicos aplicaron la táctica de la elevación de la cola de los lagartos a un pequeño vehículo robótico con cuatro ruedas apodado Tailbot («robot con cola»). Fijaron una cola estabilizadora en la parte trasera del vehículo y evaluaron su habilidad para ascender por una rampa. Observaron que, cuando el Tailbot mantenía la cola bajada, su morro se hundía en el momento de abandonar la rampa. En cambio, cuando la izaba como el lagarto agama, saltaba la rampa y era capaz de aterrizar sobre sus ruedas en una posición más equilibrada. Full y sus estudiantes investigan ahora el papel que desempeña la cola en el control del alabeo (y del cabeceo y la guiñada) durante la circulación.

Esos son tan solo los últimos logros fruto de la fascinación de Full por los robots inspirados en lagartos. El robot Stickybot, una colaboración mecánica con la Universidad Stanford en 2006 que podía subir por superficies lisas, como las ventanas, mediante un adhesivo, se diseñó imitando la estructura de filamentos microscópicos descubiertos en las patas de las salamanquesas.

Otros ejemplos de máquinas biomiméticas incluyen el sistema de soporte de la legión de piernas (LS3, por sus siglas en inglés) de Boston Dynamics, que recuerda a una mula de carga sin cabeza, y un robot similar a un gusano que está siendo desarrollado por la Universidad Harvard.

Esos modelos no humanos permiten a los ingenieros mejorar el diseño robótico pieza a pieza, detectando problemas específicos y aprendiendo de la forma en que los animales los resuelven.

—Larry Greenemeier

ASTRONOMÍA

La búsqueda de las primeras galaxias y de señales extraterrestres

Más de 44.000 antenas de radio se unirán pronto a través de Internet para formar uno de los radiotelescopios interconectados más ambiciosos jamás concebidos. Su tarea consistirá en analizar frecuencias de radio casi inexploradas hasta ahora, rastrear las primeras estrellas y galaxias, y tal vez descubrir posibles señales de inteligencia extraterrestre.

El conjunto de antenas ha sido diseñado para detectar ondas de radio de baja frecuencia. Dicha radiación fue la emitida por el hidrógeno frío que pobló el universo durante las «épocas oscuras», el período que transcurrió desde que se formaron los primeros átomos (unos 400.000 años después de la gran explosión) hasta que comenzaron a nacer las primeras galaxias (unos pocos cientos de millones de años después). A medida que las estrellas fueron apareciendo, su luz dejó una impronta característica sobre ese gas, por lo que las ondas de radio que este emite codifican una gran cantidad de información sobre el universo primitivo y la formación de las primeras galaxias.

La Batería de Radiotelescopios de Baja Frecuencia (LOFAR, por sus siglas en inglés) conectará por medio de cables de fibra óptica las antenas de 48 estaciones situadas en los Países Bajos, Alemania, Francia, Suecia y Reino Unido. Un ordenador de proporciones gigantescas combinará y analizará las señales recibidas en todas ellas, lo que las convertirá en lo que bien podría ser el radiotelescopio interconectado más complejo y versátil del mundo, explica Heino Falcke, directivo del experimento.

LOFAR, que podrá barrer todo el hemisferio boreal en 45 días, tiene previsto comenzar en breve su primera fase de operaciones. El conjunto gozará de una resolución máxima equivalente a la de un telescopio de 1000 kilómetros de diámetro. Asimismo, su diseño permitirá añadir con posterioridad otras estaciones, explica Michael Wise, de ASTRON, el Instituto de Radioastronomía de los Países Bajos. LOFAR operará con gran rapidez y podrá medir sucesos de tan solo cinco nanosegundos de duración. Y, dado que se compone de un gran número de radiotelescopios, podrá llevar a cabo hasta tres proyectos científicos de forma simultánea, señala Wise.

Además, durante los próximos años el telescopio se unirá al proyecto internacional de búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) y explorará el cielo a la caza de emisiones de radio artificiales en frecuencias bajas, poco estudiadas por las misiones SETI anteriores.

—Charles Q. Choi y Space.com



Estación de LOFAR en los Países Bajos

BIOLOGÍA DEL DESARROLLO

La morfogénesis según Alan Turing

El padre de la computación moderna, de cuyo nacimiento se celebra este mes el centenario, formuló un modelo clave para entender la formación de patrones en los seres vivos

El artículo de 1952 en el que Alan Turing expuso su teoría sobre la formación de patrones en sistemas biológicos resolvió un profundo problema intelectual. Uno cuya solución se había antojado tan inalcanzable que acabó provocando que Hans Driesch, uno de los pioneros de la biología del desarrollo, abandonase la ciencia para dedicarse a la filosofía vitalista.

Hacia finales del siglo XIX, Driesch y, más tarde, Hans Spemann habían demostrado que un animal no crece a partir de una versión microscópica del cuerpo adulto (el hipotético homúnculo, en el caso de los humanos), sino que emerge a partir de una única célula sin estructura definida. Pero las ideas de la época no permitían entender tal autoorganización. Con anterioridad a la invención de los ordenadores, la matemática aplicada solo podía lidiar con ecuaciones diferenciales lineales, las cuales permiten amplificar un patrón, pero no generarlo.

En «Los fundamentos químicos de la morfogénesis» Turing demostró que un patrón podía, de hecho, formarse *de novo*. Al considerar el desarrollo de un embrión en cada instante a partir de su estado molecular y mecánico, Turing empleó un enfoque moderno. Hoy, los biólogos del desarrollo investigan con herramientas similares la manera en que los determinantes moleculares y las fuerzas que ejercen las células controlan el desarrollo de patrones en el embrión.

Turing se centró en los patrones de naturaleza química. Acuñó el término *morfógeno* para referirse a una molécula con la capacidad de inducir una diferenciación tisular. Hoy este concepto no resultará ajeno a ningún biólogo molecular: los productos proteicos de los genes *HOX*, por ejemplo, esenciales para la formación de patrones corporales en el reino animal, no son sino morfógenos en el sentido en el que Turing los definió. (De un modo un tanto confuso, el significado del término ha ido estrechándose desde entonces.)

En la raíz de la idea de formación de patrones descansa el concepto de ruptura de simetría. Turing consideró un modelo de embrión que comenzaba con una concentración uniforme de morfógenos. En él, la simetría inicial frente a traslaciones iba desapareciendo a medida que se formaban los tejidos. El trabajo de Turing planteaba algunas preguntas fundamentales que aún hoy continúan sin respuesta. Advirtió que, si bien todas las leyes físicas conocidas hasta el momento gozaban de simetría especular, esta desaparecía en los seres vivos. Turing conjeturó que la asimetría observada en los organismos podía tener su origen en la que presentan las moléculas biológicas. Hoy, sus ideas continúan siendo relevantes en lo que concierne al origen de la vida.

El modelo de Turing se apoyaba de un ardid matemático: creó un sistema no lineal a partir de uno lineal mediante la activación brusca de procesos de difusión en un instante determinado. Sin difusión, el sistema es estable y homogéneo; con ella, se desestabiliza y genera patrones espaciales. La brillantez de la idea residía en que los aspectos no lineales quedaban confinados a un instante en el tiempo, de modo que en cualquier otro momento solo se requerían ecuaciones lineales. Turing logró así que la difusión generase patrones en lugar de difuminarlos, como suele ocurrir.



ANDY POTTS/NATURE

Resulta difícil sobrevalorar la influencia del artículo de Turing. Supuso un punto de transición entre la era de la matemática analítica y la computacional. Aunque su demostración se basaba en cálculos analíticos, el artículo incluía la primera simulación por ordenador de formación de patrones en presencia de oscilaciones estocásticas. De hecho, es posible que se tratase del primer trabajo público en el que se incluyó una experimentación computacional.

Turing empleó argumentos analíticos del siglo XIX para abrir el camino a las simulaciones numéricas del siglo XXI. Tenía muy claro, sin embargo, que la ciencia no lineal y la biología del desarrollo requerirían métodos computacionales más avanzados. «La mayor parte del organismo evoluciona durante la mayor parte del tiempo de un patrón a otro, no desde la homogeneidad hacia un patrón», escribió. Y supo percatarse de que, aunque una teoría general que englobase todos esos

procesos quizá fuese inalcanzable, un ordenador digital debía ser capaz de modelizar casos concretos.

Aún hoy el trabajo de Turing se malinterpreta con frecuencia, quizá debido a que su trágica muerte prematura, en 1954, le impidió corregir el documento. Sus argumentos se toman a menudo como si fuesen predicciones biológicas, cuando Turing nunca los concibió como tales. Su modelo hipotético de dos sustancias describía una situación simplificada: para lograr la formación de patrones, una de ellas debía catalizar la síntesis de las dos sustancias y difundirse lentamente, mientras que la otra debía catalizar la destrucción de ambas y difundirse con rapidez. En el caso de patrones que cambiasen con el tiempo, se necesitarían tres sustancias. Desde hace algunos años estos modelos han dado lugar a un activo campo de investigación, pero la responsabilidad de los resultados, para bien o para mal, recaerá sobre sus autores, no sobre Turing.

A Turing hemos de agradecerle el mérito de haber abierto la puerta a una nueva manera de ver la biología del desarrollo: una en la que nos enfrentamos a las reacciones químicas e interacciones mecánicas que tienen lugar en un embrión que se autoorganiza a partir de una sola célula. En este sentido, Turing se adelantó a su tiempo: su investigación vio la luz tres décadas antes de que los estudios con embriones de *Drosophila* realizados por Lewis, Wieschaus y Nüsslein-Volhard condujesen al descubrimiento de morfógenos reales. Los jóvenes investigadores de hoy serán quienes más se beneficiarán de la lectura del trabajo de Turing, si entienden sus ideas sobre la morfogénesis no como una conjetura, sino como un marco conceptual desde el que afrontar problemas concretos.

—John Reinitz
Departamentos de estadística, ecología y evolución, genética molecular y biología celular
Universidad de Chicago

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 482, pág. 464, febrero de 2012. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

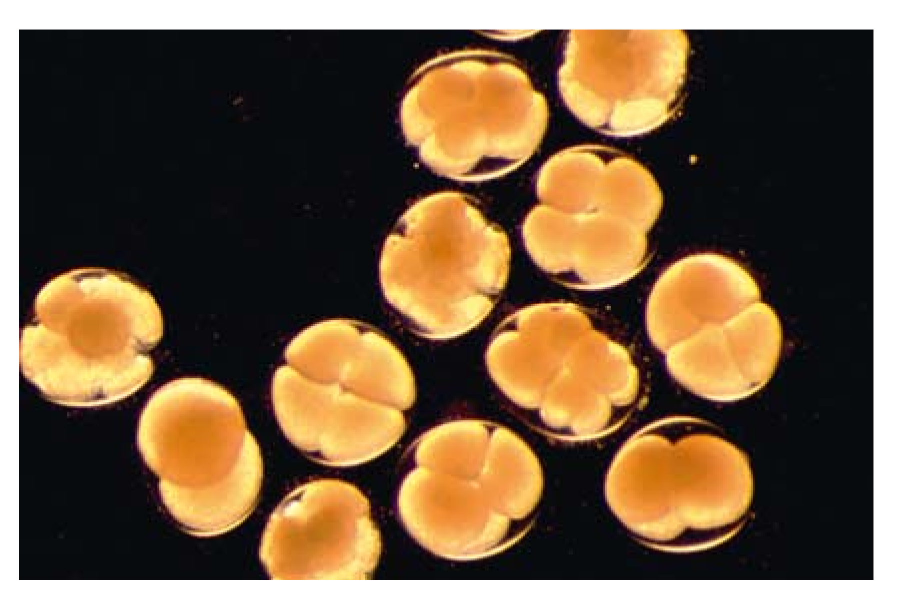
BIOLOGÍA

La evolución de la poliandria

Las razones que explican el apareamiento promiscuo de las hembras son objeto de debate entre los biólogos evolutivos

Durante siglos se ha considerado que la relación sexual dominante en el mundo animal era la monogamia. Sin embargo, en las últimas décadas, la aplicación sistemática de los análisis de paternidad al estudio del comportamiento ha puesto de manifiesto la amplia presencia de otro fenómeno: la poliandria, el apareamiento de una hembra con varios machos en el transcurso de un mismo episodio reproductivo. Si tomamos como ejemplo uno de los iconos tradicionales de la monogamia, las aves que forman parejas estables, descubrimos que las hembras de más del 70 por ciento de las especies de este grupo copulan con otros machos. Y esto no es una excepción: la poliandria es la norma en un gran número de grupos animales.

La poliandria comporta una serie de implicaciones evolutivas de gran calibre y, por ello, su estudio atrae la atención de investigadores en todo el mundo. La consecuencia más importante del comportamiento poliándrico se puede ilustrar con un trabajo clásico que estudió el comportamiento sexual de un grupo de macacos a lo largo de ocho años. El macho dominante del clan consumó el 70 por ciento de las cópulas, mientras que el segundo en el orden de jerarquía apenas participó en el 14 por ciento de ellas. En cambio, el número de descendientes engendrado por el macho dominante resultó ser la mitad que el de su subordinado. De ello se desprende que, en los machos, el éxito en el apareamiento no



Apenas unas horas después de la fusión del óvulo y el espermatozoide del erizo de mar *Heliocidaris erythrogramma*, se aprecia con claridad el cigoto, inmerso en pleno proceso de división celular. Que acabe siendo un individuo viable dependerá en gran medida del aporte genético del padre y de la madre, y de la combinación de ambos complementos genéticos. El apareamiento múltiple por parte de la hembra puede incrementar las probabilidades de que se encuentre un macho genéticamente compatible y, por tanto, de engendrar una descendencia viable o de mayor calidad genética. Esta especie constituye uno de los modelos biológicos utilizados por el autor y sus colaboradores para el estudio de los beneficios genéticos de la poliandria.

FRANCISCO GARCÍA GONZÁLEZ

garantiza el éxito en la procreación cuando impera la poliandria.

Y eso, ¿qué significa? Pues, sencillamente, que la selección sexual opera antes y después del apareamiento. La competencia entre machos después de la cópula (entre sus espermatozoides) por la fecundación de los óvulos de la hembra constituye un fenómeno común. De manera similar, las hembras pueden desplegar mecanismos que permiten decantar la paternidad hacia una u otra pareja. La poliandria, en suma, prolonga la selección sexual más allá del apareamiento y, puesto que solo los machos que consigan fecundar los óvulos dejarán descendencia, la selección post-cópula favorece caracteres ligados al éxito en la fecundación. Ahora sabemos, por ejemplo, que la selección impuesta por la competencia espermática ha modelado rasgos como la calidad y morfología de los espermatozoides, el tamaño de los testículos y la forma de los genitales. Diversos estudios del autor y colaboradores, en los cuales se mantuvo a varias poblaciones de un escarabajo en condiciones de monogamia o de poliandria durante más de 20 generaciones, han aportado pruebas de ello: la inversión en el tejido testicular y en la morfología genital masculina (y también femenina) de las poblaciones monógamas y promiscuas fue distinta.

El enigma

¿Por qué la poliandria es tan común? Hallar una respuesta a esta pregunta supone un reto para los biólogos evolutivos. Pero, antes que nada, para entender por qué esta pregunta resulta pertinente, debemos repasar algunas de las diferencias básicas entre los sexos.

Las diferencias en el tamaño y la producción de los gametos entre ambos sexos resultan evidentes en la mayoría de las especies. De hecho, tales diferencias definen lo que entendemos por machos y hembras. El sexo cuyos individuos llamamos machos produce una gran cantidad de gametos, pero de tamaño reducido (espermatozoides); los individuos del sexo que produce pocos gametos de gran tamaño (óvulos) se denominan hembras. De igual claridad, aunque a menudo poco conocidas, son las profundas implicaciones que estas simples desigualdades en el tamaño y número de las células sexuales han impuesto, desde un punto de vista evolutivo, en el comportamiento sexual de ambos géneros. Para comprender estas implicaciones, conviene seguir el rastro de las diferencias sexuales derivadas de la fusión de gametos de tamaño dispar.



Pocas aves parecen resistir el escrutinio de la fidelidad, porque la lista de especies que entablan lazos nupciales sin renunciar por ello a los devaneos amorosos crece día a día: golondrinas y gorriones comunes, estorninos pintos o urracas, por citar algunas cercanas y familiares. Las hembras aprovechan el descuido o la ausencia de su pareja o sus propias escapadas del nido para consumar el escarceo. Las pruebas de paternidad revelan que, en algunas especies en que el padre comparte las labores de cría, puede llegar a cuidar de tantos polluelos que no son sus hijos como de crías que sí lo son, o incluso más. La poliandria «encubierta» de estas hembras amplía la diversidad genética de su descendencia, un rasgo que puede ser beneficioso en entornos cambiantes o impredecibles.

En primer lugar, pensemos en la inversión que realiza cada sexo en la procreación. De partida, durante la fecundación, las hembras aportan no solo la mitad del material genético del cigoto, sino también la maquinaria y los nutrientes necesarios para que este prospere. La inversión del macho se limita a la aportación del ADN contenido en un espermatozoide minúsculo. Esta desigualdad en la inversión de ambos progenitores se hace extensiva a las fases posteriores, puesto que el desarrollo del embrión corre a cargo de la hembra y, en muchos casos, el cuidado de los descendientes tras el nacimiento recae de manera exclusiva, o preponderante, en ella.

En segundo lugar, el potencial reproductivo de machos y hembras es notablemente desigual. Los machos fabrican espermatozoides en números astronómicos y, al menos en teoría, pueden engendrar una descendencia numerosísima. Por el contrario, el potencial reproductivo de las hembras se ve limitado por su menor producción de gametos. En otras palabras, los machos pueden mejorar su éxito reproductivo apareándose con un mayor número de hembras, pero esta relación no está tan clara en el caso femenino, puesto que el número de óvulos que puede ser fecundado en cada evento reproductivo resulta, por lo general, bajo.

Teniendo en cuenta todas esas diferencias, se entiende que surjan las siguientes preguntas: ¿Qué ganan las hembras, si es que ganan algo, al aparearse con varios machos? ¿Por qué se aparean con múltiples individuos cuando una única cópula basta para obtener un sobrado número de espermatozoides con que asegurar la fecundación de sus óvulos? Más aún, ¿por qué la poliandria es tan común si la copulación con múltiples parejas acarrea una serie de riesgos como las enfermedades de transmisión sexual o caer en manos de un depredador cuando se está enfrascado en pleno acto amoroso?

¿La solución?

La poliandria se puede ver favorecida por la selección natural si, gracias al apareamiento múltiple, las hembras obtienen réditos que redundan en una mayor eficacia biológica (número de descendientes viables) y tales beneficios compensan los costes asociados a un comportamiento promiscuo. Y así es en muchos casos. En algunas especies las hembras obtienen beneficios materiales o directos. Por ejem-

plo, pueden copular con varios machos para asegurar la fecundación de todos sus óvulos, sobre todo si existen problemas de infertilidad masculina. En otras situaciones, la poliandria puede facilitar la adquisición de mejores territorios de cría, o bien disponer de más parejas que participen en el cuidado de la prole. La poliandria puede incluso reportar alimento, como sucede con algunas especies de insectos en que los machos ofrecen «regalos nupciales» en forma de presas.

Otros beneficios del comportamiento poliándrico son los de naturaleza genética. Las hembras se pueden aparear con varios machos para obtener «buenos genes», es decir, genes que confieran a la descendencia una alta calidad genética. De hecho, varios estudios del autor y colaboradores demuestran que, en algunas especies, existe una gran variación genética en la capacidad de los machos para engendrar descendencia viable. En tales casos, la conducta promiscua de las hembras les permite «filtrar» esta calidad genética y obtener «buenos genes» para su progenie. La ganancia también puede consistir en genes que mejoren el atractivo de los descendientes. Y se ha comprobado que, en otros casos, la poliandria asegura la compatibilidad genética entre la hembra que actúa de manera promiscua y, al menos, uno de los machos con los que se aparea. La consecuencia es un aumento en la calidad genética de la descendencia, no porque el padre sea portador de buenos genes, sino por la combinación adecuada de genes de ambos progenitores. Estos mecanismos de compatibilidad genética cobran especial importancia en los casos en que el riesgo de cruzamientos con individuos emparentados (endogamia) es alto. Se ha propuesto que la poliandria también puede resultar favorecida por la selección natural si propicia un aumento de la diversidad genética de la descendencia. La progenie de una hembra poliándrica comparte los genes de la madre, pero los genes paternos difieren entre los medios hermanos, y esta diversidad genética puede suponer un garante de éxito cuando se vive en ambientes cambiantes.

Laboratorios de todo el mundo están estudiando los beneficios de la poliandria en diferentes animales. Con todo, algunos investigadores cuestionan hasta qué punto la existencia de beneficios explica esta conducta y centran su interés en analizar la implicación de los conflictos sexuales en la evolución de este comportamiento.

El conflicto sexual

Los intereses reproductivos de ambos sexos solo convergen en aquellas especies en que existe una estricta monogamia genética, puesto que, solo en tales casos, la descendencia es común para los dos individuos involucrados en la reproducción. En los demás casos, los intereses de machos y hembras suelen diferir en cuanto al apareamiento y otros aspectos relacionados con la reproducción y el cuidado parental. Este conflicto entre los intereses evolutivos se conoce como conflicto sexual. Como se ha apuntado antes, en términos generales los machos pueden incrementar su eficacia biológica si son más promiscuos. En las hembras, en cambio, la eficacia biológica se maximiza normalmente con un número de apareamientos más bajo. Por tanto, el conflicto entre sexos en cuanto al grado de promiscuidad es frecuente. ¿Adónde conduce esta pugna?

El alto potencial reproductivo de los machos significa que la competencia entre ellos es intensa. Esta puede llegar a ser tan dura que hace aparecer atributos masculinos de «irresistible atractivo» que manipulan o fuerzan las decisiones femeninas sobre el apareamiento y acaban perjudicando sus intereses. Según este argumento, la promiscuidad femenina, al menos en algunas especies, no se explicaría por los beneficios derivados del apareamiento con varios machos, sino que sería una consecuencia de los intereses masculinos. En otras palabras, las hembras no fomentarían de forma activa el comportamiento poliándrico.

Los ejemplos de conflicto sexual abundan por doquier en el mundo animal. El aparato genital masculino de numerosos insectos está dotado de espinas. Las funciones de tales artefactos van desde eliminar el esperma ajeno del conducto reproductor femenino, hasta el objetivo menos amigable de dañar dicho conducto para reducir las posibilidades de que la hembra se aparee con un competidor. Un caso clásico de conflicto sexual lo protagoniza la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*, cuyos machos transfieren durante la cópula ciertas sustancias seminales que no sólo reducen la receptividad sexual de su compañera sino que también acortan su longevidad.

A pesar de que en algunas especies parece que el grado de promiscuidad femenina responde a la selección sexual intensa en los machos, no es fácil separar las explicaciones basadas en beneficios de aquellas fundadas en el conflicto se-

xual. Las hembras de una especie sometida a un conflicto sexual intenso pueden obtener beneficios del apareamiento con machos de un «atractivo arrebatador», puesto que así sus hijos heredarán su capacidad de seducción.

En resumen, la poliandria tiene implicaciones evolutivas importantes. La investigación de las presiones selectivas que determinan la existencia de este sistema de apareamiento ha propiciado progresos considerables en nuestra comprensión de las interacciones sexuales. Las últimas décadas han sido testigos de grandes avances, pero quedan muchas cuestiones por resolver. Sin duda, los aportes conjuntos de disciplinas como la genética cuantitativa, la etología y la ecología evolutiva permitirán hallar las respuestas en un futuro no muy lejano.

—Francisco García González
Centro de Biología Evolutiva
Universidad de Australia Occidental

HISTORIA DE LA FÍSICA

La teoría del electrón cumple 120 años

El modelo del electrón propuesto por Hendrik Lorentz en 1892 sirvió de nexo entre la física clásica y la moderna

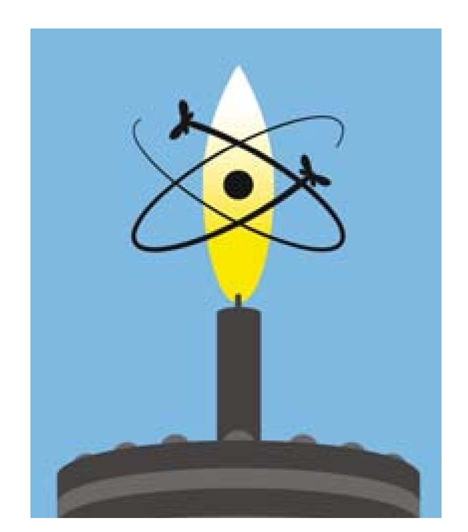
Este mes se cumplen 120 años de una creación tan profunda como influyente: la teoría del electrón propuesta por Hendrik Antoon Lorentz. Su electrón no era solo una hipotética partícula elemental, sino la piedra angular de una ambiciosa teoría de la naturaleza. Hoy, los físicos se han acostumbrado a la idea de que una descripción completa del mundo pueda emerger a partir de unas ecuaciones simples y elegantes. Con anterioridad al trabajo de Lorentz, sin embargo, dicha posibilidad no pasaba de pura mística.

Para la mayoría de los expertos, el momento cumbre de la física del siglo xix llegó con la teoría de los campos eléctricos y magnéticos, englobados en la síntesis matemática que James Clerk Maxwell publicó en 1864. Desde entonces, la disciplina fue cubierta por una bruma que solo se despejó cuando, a principios del siglo xx, nacieron la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Esta leyenda ensombrece el nexo que existió entre ambos momentos, un logro brillante en sí mismo y construido gracias a una labor heroica.

Para ponernos en contexto debemos, en primer lugar, admitir una blasfemia: la exposición de Maxwell sobre sus propias ecuaciones es un auténtico caos. En sus artículos no encontraremos por ningún lado la estructura clara, compacta y elegante bajo la cual los estudiantes aprenden hoy las «ecuaciones de Maxwell». En su lugar, hallamos un cúmulo de símbolos y un torrente descontrolado de palabras y ecuaciones. Maxwell, un hombre humilde, no supo percatarse de que estaba escribiendo poesía para la posteridad, digna de ser grabada en piedra, por lo que se limitó a sintetizar en lenguaje matemático todos los conocimientos de su época sobre la electricidad y el magnetismo. En sus escritos, las ecuaciones fundamentales se mezclan con una fenomenología improvisada.

Lorentz purificó el mensaje que escondían las ecuaciones de Maxwell y separó el grano de la paja. El grano: cuatro ecuaciones que describen la respuesta de los campos eléctricos y magnéticos a las cargas eléctricas en movimiento, más otra que especifica la fuerza que esos campos ejercen sobre una carga. La paja: todo lo demás.

Desde entonces contamos con un conjunto de ecuaciones bien definidas que nos permiten describir el comportamiento de los objetos que poseen una masa y una carga dadas. Pero ¿podían emplearse esas ecuaciones para erigir una teoría de la materia basada en un concepto idealizado de «átomo» de carga eléctrica? Esa fue la tarea que Lorentz acometió con su teoría del electrón. A partir del artículo de 1892, Lorentz y sus adeptos emplearon dicha teoría para explicar, una tras otra, las propiedades de la materia: la conducción de la electricidad y el calor, el comportamiento dieléctrico, o la reflexión y la refracción de la luz, entre otras. De esa manera sentaban los cimientos de las disciplinas que hoy denominamos electrónica o ciencia de materiales. El broche de oro llegó en 1897, cuando Joseph John Thomson demostró experimentalmente la existencia del electrón. (Podríamos decir que este fue concebido en 1892 y que nació 1897.)



Gran parte del artículo de Lorentz de 1892 versa sobre la idea, muy tentadora pero no exenta de problemas, de que la masa del electrón se deba a su carga eléctrica. Una carga en movimiento genera campos eléctricos y magnéticos, los cuales exhiben una resistencia natural al cambio y, a su vez, afectan al movimiento de la partícula. ¿Podría ser dicha reacción del electrón a su propio campo la causante de su inercia y, por ende, de su masa? Tales ideas cuentan con una larga historia: Aristóteles ya había intentado explicar la inercia de los cuerpos a partir de la resistencia que el aire oponía a su movimiento. La idea de Lorentz acerca de una «masa electromagnética» ejerció una influencia enorme. Uno de los trabajos técnicos que inspiró su propuesta, realizado junto a Henri Poincaré, anticipó buena parte de las ideas de la teoría de la relatividad especial de Albert Einstein.

Sin embargo, la llegada de la mecánica cuántica cambió las reglas del juego, y la idea que de la masa del electrón se debiese a una reacción a su propio campo dejó de resultar viable. Con todo, no deja de resultar sorprendente que, años después, mis colaboradores y yo lográsemos explicar la masa de los protones, neutrones y otras partículas que experimentan los efectos de la interacción nuclear fuerte a partir de una idea similar a la de Lorentz. La inercia de esas partículas se debe al efecto que sobre ellas genera su propio campo de

THOMAS FUCHS

gluones, partículas que quedan descritas por la hermana mayor del electromagnetismo: la cromodinámica cuántica. Aunque por lo general se concede a la partícula de Higgs el mérito de dotar de masa a la materia, su contribución a la masa final de la materia ordinaria resulta muy pequeña. La bella idea de Lorentz, en su versión moderna, explica la mayor parte de la masa del mundo que nos rodea.

Aunque finalmente reemplazada por otra, la teoría del electrón de Lorentz desempeñó un papel fundamental en el camino hacia la física moderna. Al identificar las respuestas correctas a las preguntas adecuadas, Lorentz allanó el camino a la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Hacia el final de su vida, Einstein le dedicó un homenaje memorable: «Para mí, él significó más que cualquier otro a quien haya encontrado en el viaje de mi vida».

—Frank Wilczek es físico teórico en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 2004 recibió el premio Nobel de física por su contribución al desarrollo de la cromodinámica cuántica, la teoría de las interacciones nucleares fuertes.

MEDIOAMBIENTE

La laguna de Gallocanta

Un medio físico excepcional confiere valor ambiental al mayor lago salino europeo en tierras áridas de interior

La laguna de Gallocanta, situada en el Sistema Ibérico entre Zaragoza y Teruel, constituye un entorno singular donde confluyen valores biológicos con un medio físico excepcional. Resulta llamativa la existencia de humedales naturales en zonas donde las precipitaciones son muy inferiores a la cantidad de agua que se evapora. Así sucede en Gallocanta y otros humedales salinos de cuencas terciarias ibéricas, como los Monegros y La Mancha. Todos ellos dan lugar a hábitats de gran valor científico y ecológico, así como de interés para la conservación. El carácter endorreico de Gallocanta y su ubicación, a casi 1000 metros de altitud, hacen que destaque entre los humedales de interior en Europa occidental, siendo el mayor lago salino conservado.

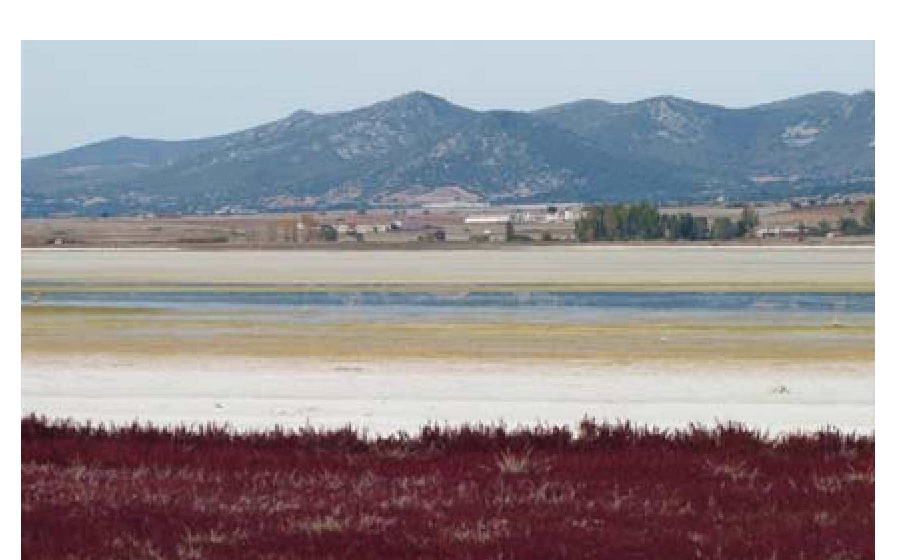
El clima, semiárido, se caracteriza por una precipitación media anual de 458 mm (datos del período 1973-2001), con variaciones de entre 297 y 722 mm. La temperatura media anual es de 11 ºC, y se han registrado temperaturas extremas de –22,4 ºC (17 de diciembre de 1973), y 39,7 ºC (30 de julio de 1995). El calor estival y el frecuente viento producen una elevada evaporación en la laguna, no solo en la lámina de agua (1107 mm por año), sino también en las orlas de suelo húmedo y de vegetación (762 mm por año). Debido a que la evaporación supera las lluvias, se produce un déficit hídrico que puede exceder los 500 mm anuales repartidos en 8 meses, entre marzo y septiembre, aunque más de la mitad de ese déficit suele darse entre julio y agosto. La laguna se alimenta de aguas superficiales, aportadas por lluvia directa y arroyos intermitentes, y de aguas subterráneas. Debido a que ambos tipos de aporte se hallan condicionados por la variabilidad estacional e interanual de las precipitaciones, se producen constantes fluctuaciones del nivel de agua de la laguna y de su salinidad.

La superficie lagunar actual que puede llegar a inundarse en épocas de aguas altas es de unos 14 kilómetros cuadrados (km^2); en algún año húmedo la laguna ha sobrepasado los 2 metros de calado. Los estudios geológicos consideran la laguna actual como un residuo testimonial de otra mucho más extensa y profunda, formada en épocas más húmedas, que incluiría los cuerpos lagunares existentes en la zona: numerosos navajos y lagunillas, intermitentes o permanentes, como son los de La Zaida, Guialguerrero y La Dehesa.

Los suelos reflejan la historia

La cuenca de Gallocanta es un conjunto endorreico de origen kárstico (disolución del sustrato carbonatado, o karst) con más de 20 lagunas, balsas y navajos. Alimentadas por torrentes y arroyos, o bien por manantiales y rezumes, algunas lagunas están colmatadas por sedimentos, aunque el color y otras características del suelo atestiguan su pasado lagunar. La alternancia de períodos de llenado y vaciado durante los últimos seis decenios, relacionada principalmente con la distribución de las lluvias, ha quedado registrada en los sedimentos con diferentes grados de edafización (la formación de suelo más o menos fértil por acción de la intemperie y los seres vivos).

A escala geológica, el relleno de la laguna es simultáneo a la retracción asociada al progresivo hundimiento del sustrato. Los sedimentos del fondo tienen unos 32.000 años de antigüedad a menos de 2 metros de profundidad, y revelan que la laguna adquirió carácter salino



La laguna de Gallocanta se inunda de forma estacional o temporal, con un calado máximo, en 1974, de 2,29 m de profundidad y 15 km^2 de extensión. El viento contribuye a la desecación y al continuo modelado del fondo y las costas de la laguna. Las costras salinas, tejidas con abundantes tapetes microbianos y de algas, pueden salvaguardar localmente la humedad del suelo.

IMÁGENES CORTESÍA DE CARMEN CASTAÑEDA



Mediante la apertura o excavación de calicatas, los expertos reconocen, describen y muestrean el suelo. En este perfil edáfico se aprecian capas de distinto color (horizontes), que indican las diferentes condiciones ambientales a lo largo de la sedimentación carbonatada (lacustre, palustre, fluvial, costera) y la posterior edafización. Las fluctuaciones del agua subterránea han favorecido los procesos de oxidación y reducción en el horizonte más amarillento. Diversas técnicas de laboratorio permiten determinar la granulometría, mineralogía y composición química de los horizontes, lo que ayuda a interpretar la ecología del suelo, actual y pasada. El perfil edáfico refleja la historia del humedal y el funcionamiento actual de los suelos, soporte insustituible tanto de la agricultura como de la biodiversidad.

entre los siglos XII y XIV. Tras este período cálido se detecta una época fría entre los siglos XVI y XIX.

Las frecuentes oscilaciones hídricas de la laguna y los sedimentos de los últimos 10.000 años, estudiados mediante isótopos, mineralogía y polen, atestiguan cambios climáticos globales, con episodios locales diferentes a los de otros lagos españoles. Las oscilaciones culminan con un cambio hacia la aridez a mediados del siglo XIX, común a otros humedales de la cuenca del Ebro (Chiprana y Mediana). Los sedimentos registran una expansión de la agricultura en detrimento del carrascal hacia 1900.

En el futuro, el estudio de los suelos de la región como elemento del paisaje y hábitat de plantas y animales ayudará a desvelar las condiciones ambientales actuales y pasadas, y permitirá entender el funcionamiento de la laguna con vistas a su conservación.

Ecología y medidas de conservación

El interés ecológico de la laguna de Gallocanta radica en las poblaciones de animales, vegetales y microorganismos que alberga. Desde el punto de vista botánico, la diversidad está asociada a las fluctuaciones del nivel de agua de la laguna y, especialmente, al tipo de suelo y al ambiente salino. La vegetación que orla la laguna favorece la conservación de los suelos y filtra las aguas de escorrentía, aspecto crucial para la nidificación y alimentación de aves limícolas. Destacan las praderas salinas con especies protegidas como *Puccinellia pungens* y *Microcnemum coralloides*, y las praderas subacuáticas de algas filamentosas. La diversidad faunística incluye cientos de especies de vertebrados. Decenas de miles de aves recalan en la laguna en sus viajes migratorios y algunas pasan el invierno en Gallocanta, con la grulla (*Grus grus*) como especie emblemática. El zooplancton se caracteriza por el dominio de especies adaptadas a ambientes hídricos fluctuantes.

La conciencia conservacionista en torno a la laguna comenzó en la década de los setenta del siglo XX, destacando la visita del carismático Félix Rodríguez de la Fuente y su innegable repercusión. A diferencia de lo ocurrido en otras lagunas interiores españolas, en Gallocanta se contuvieron los últimos intentos para desecarla.

Los esfuerzos por proteger la zona se fueron sucediendo en los siguientes decenios. En 1985 se declaró Refugio Nacional de Caza, que abarcaba 67,2 km², y en 1987, Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), cuya delimitación se amplió hasta 175 km² en 2001. En 1994 fue reconocida Humedal Internacional Ramsar por las poblaciones de aves que alberga, especialmente en épocas de migración. Sin embargo, este importante hito fue insuficiente para armonizar los criterios de las diferentes administraciones y sus atribuciones sobre la laguna. Así, la esperada delimitación del dominio público hidráulico por parte de la Administración del Estado a través de los organismos de cuenca propiciará la recuperación de hábitats, si se aplican unos criterios adecuados.

El actual instrumento de gestión es el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN), aprobado en 2006 tras

once años desde el inicio del procedimiento. La Reserva Natural Dirigida (19,2 km²), declarada en el mismo año, comprende la superficie inundable (el 70 por ciento de la superficie de la reserva) y una orla dominada por halófitos; queda rodeada por los cultivos de la Zona Periférica de Protección (45,5 km²). En la reserva se establece un régimen jurídico de protección y gestión de valores naturales, que incluye el paisaje y las formaciones geomorfológicas.

La profundización y divulgación del conocimiento de la historia, funcionamiento y estado actual de este enclave privilegiado contribuirán a desarrollar su aprecio por la población local y permitirán compaginar el disfrute y admiración de los visitantes con los intereses agrícolas en juego.

—Carmen Castañeda y Raquel Romeo
Estación Experimental de Aula Dei
CSIC, Zaragoza

NEUROCIENCIAS

Se acabó estudiar en el último minuto

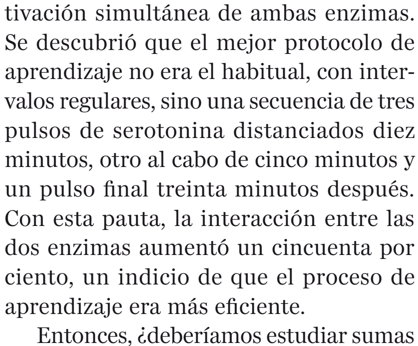
Los intervalos de aprendizaje cortos e irregulares podrían resultar más efectivos

Los profesores de instituto y de universidad siempre animan a sus alumnos a evitar las intensivas jornadas de estudio de última hora. Estudiar poco a poco a lo largo del semestre es mucho más efectivo. Un estudio publicado en *Nature Neuroscience* el pasado mes de febrero parece demostrar el fundamento biológico de este axioma pedagógico. También va un paso más allá al sugerir una forma de optimizar los períodos de aprendizaje; un descubrimiento que, en teoría, podría dar lugar a nuevas estrategias para memorizar la estructura molecular de la maitotoxina o un ideograma chino.

El estudio, dirigido por el neurobiólogo John H. Byrne, de la facultad de medicina de la Universidad de Texas, en Houston, ha arrojado nuevos datos sobre un método de aprendizaje desarrollado en el laboratorio del premio nóbel Eric R. Kandel en la Universidad de Columbia. La técnica de Kandel consistía en aplicar una descarga eléctrica a la cola de una babosa de mar (*Aplysia californica*) a intervalos regulares, y más tarde comprobar si el animal reaccionaba de forma excesiva al recibir una descarga menor, señal de que recordaba la experiencia anterior.

El objetivo del Byrne y su equipo consistía en determinar si las reacciones químicas que subyacían a esta respuesta podrían modificarse para mejorar el proceso de aprendizaje. En lugar de utilizar una babosa viva, pusieron algunas de las células nerviosas del gasterópodo (neuronas sensoriales y motoras) en una placa y sustituyeron las descargas eléctricas por cinco pulsos del neurotransmisor serotonina espaciados veinte minutos. La serotonina activa dos enzimas que inician una cascada bioquímica, que culmina con la activación en las neuronas de señales de tipo «Me acuerdo de esto. Duele».

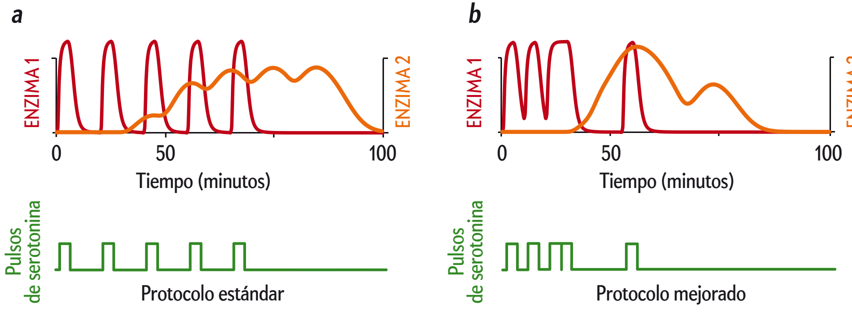
Las dos enzimas implicadas trabajan en tándem. Sin embargo, mediante esa serie estándar de pulsos a intervalos regulares, no alcanzaron su activación máxima en el interior de una célula a la vez, lo cual sugería que el protocolo de aprendizaje utilizado podía no ser el óptimo.

Los investigadores desarrollaron un modelo informático de la activación dinámica de las dos enzimas, con el que simularon 10.000 protocolos alternativos, cada uno con una secuencia de pulsos distinta. Luego analizaron los resultados para determinar cuál se correspondía con la ac-tivación simultánea de ambas enzimas. Se descubrió que el mejor protocolo de aprendizaje no era el habitual, con intervalos regulares, sino una secuencia de tres pulsos de serotonina distanciados diez minutos, otro al cabo de cinco minutos y un pulso final treinta minutos después. Con esta pauta, la interacción entre las dos enzimas aumentó un cincuenta por ciento, un indicio de que el proceso de aprendizaje era más eficiente.

Entonces, ¿deberíamos estudiar sumas de Riemann un día sí y otro no durante dos semanas y, después, dejar pasar un mes antes de volver a ellas? Es demasiado pronto para asegurarlo. El protocolo de intervalos descrito por Byrne podría corresponder a la forma que tiene la babosa de adaptarse para huir de un depredador, al permitirle escapar de las pinzas de las langostas que intentan atrapar su cola. Es posible que el estudio del cálculo integral funcione de otra forma.

Ese trabajo sugiere, sin embargo, que el mejor método de aprendizaje quizá no debería basarse en sesiones regulares de estudio, lo que plantea numerosas cuestiones a los neurocientíficos.

Por su parte, Byrne y su equipo usarán ahora esas mismas técnicas para intentar optimizar otros aspectos de la formación de memoria en babosas marinas. Si tienen éxito, podrían empezar a trabajar con humanos. Las habilidades motrices serían, probablemente, el primer objetivo: arrojar una pelota, saltar obstáculos o ayudar a una persona que haya sufrido un ictus a volver a caminar. Ello se debe a que los investigadores saben más sobre los circuitos neuronales del cerebelo, responsables del movimiento, que sobre los del hipocampo, donde se inicia el tipo de memoria objetiva necesaria para estudiar química orgánica. Los deberes de ciencias tendrán, pues, que esperar. *—Gary Stix*



La activación simultánea de ambas enzimas no se logra mediante la administración de serotonina a intervalos regulares (*a*, protocolo estándar) sino a intervalos irregulares (*b*, protocolo mejorado).

FUENTE: «COMPUTATIONAL DESIGN OF ENHANCED LEARNING PROTOCOLS», POR YILI ZHANG, RONG-YU LIU, GEORGE A. HEBERTON, PAUL SMOLEN, DOUGLAS A. BAXTER, LEONARD J. CLEARY Y JOHN H. BYRNE, EN *NATURE NEUROSCIENCE*, VOL. 15, N.º 2; FEBRERO DE 2012.



PALEOANTROPOLOGÍA

El origen del género *Homo*

El hallazgo de unos fósiles extraordinarios en Sudáfrica avivan el debate sobre la evolución humana

Kate Wong

EN SÍNTESIS

El origen de nuestro género, *Homo*, sigue representando uno de los grandes misterios para quienes investigan la evolución humana.

A partir de unos pocos datos, se ha planteado que *Homo* apareció en el este de África y que la especie a la que pertenecía Lucy, *Australopithecus afarensis*, dio lugar al primer representante de nuestro linaje, *Homo habilis*.

El hallazgo reciente de fósiles en un yacimiento al noroeste de Johannesburgo podría contradecir esa interpretación. Los huesos corresponden a una nueva especie humana, cuya mezcla de rasgos de *Australopithecus* y *Homo* hace pensar a sus descubridores que podría tratarse del antepasado de *Homo*.

BRENT STIRTON, GETTY IMAGES

Una nueva especie humana hallada en Sudáfrica, *Australopithecus sediba*, ha sido propuesta como el antepasado de nuestro género, *Homo*.

Hace entre tres y dos millones de años, quizás en la sabana primigenia de África, nuestros antepasados adquirieron apariencia humana. Durante más de un millón de años sus predecesores australopitecinos, entre los que se hallaban Lucy y otros, habían prosperado en los bosques del continente africano. Ya eran bípedos y caminaban de forma similar a la nuestra, aunque poseían piernas más cortas, manos adaptadas para trepar por los árboles y un tamaño cerebral reducido, semejante al de los simios. Pero su mundo se estaba transformando. El cambio climático favoreció la expansión de la sabana y los primeros australopitecinos dieron lugar a nuevas líneas evolutivas. Uno de esos descendientes contaba con piernas largas, manos aptas para la construcción de herramientas y un cerebro más voluminoso. Era un representante del género *Homo*, el primate que dominaría el planeta.

Durante decenios, los paleoantropólogos han inspeccionado a gatas las regiones más remotas de África en busca de fósiles de los primeros individuos de *Homo* para intentar entender la forma en que nuestro género se hizo prominente. El esfuerzo se ha visto poco recompensado: un fragmento de mandíbula aquí, unos pocos dientes en otro lugar... Además, la mayoría de los fósiles recuperados, o bien corresponden a sus ancestros australopitecinos, o pertenecen a miembros posteriores del género *Homo*, especies más evolucionadas que no permiten saber cuál de nuestros rasgos distintivos surgió primero y qué fuerzas selectivas propiciaron su éxito. Todavía no se han descubierto fósiles más antiguos de dos millones de años que conserven diferentes partes anatómicas y permitan tener una visión completa del plan corporal de los primeros *Homo*. Se piensa que su origen se sitúa en África oriental, donde se han hallado los fósiles más antiguos atribuidos al género, y que las características que lo distinguen le permitieron incorporar más carne a su dieta, un alimento muy rico en calorías en un ambiente en el que los frutos secos y las frutas se habían vuelto escasos. Pero el registro resulta insuficiente, por lo que el origen de nuestro género sigue representando un misterio.

Lee Berger, paleoantropólogo de la Universidad de Witwatersrand en Johannesburgo, tal vez ha dado con una pieza importante de este rompecabezas. Hace poco se ha descubierto un tesoro fósil que podría cambiar por completo el conocimiento actual sobre las raíces de *Homo*. En su despacho del Instituto de Evolución Humana de la universidad, Berger observa cómo Bernard Wood, de la Universidad George Washington, se mueve ante cuatro cajas de plástico extraídas de un envoltorio ignífugo y colocadas sobre una mesa cubierta de terciopelo azul. Las cajas, revestidas de espuma, contienen unos fósiles de dos millones de años de antigüedad. La primera alberga una pelvis y huesos de las piernas; la segunda, costillas y vértebras; la tercera, huesos del brazo y una clavícula, y la cuarta, un cráneo. En un mostrador, enfrente de la mesa, otras cajas encierran un segundo esqueleto parcial, con una mano casi completa.

Wood, científico influyente en el campo de la evolución humana, se detiene ante el cráneo y se inclina para verlo mejor. Se acaricia la barba al advertir la dentición delicada y la cavidad craneal, del tamaño de un pomelo. Se endereza, sacude la cabeza y, tras proferir un par de exclamaciones, reconoce haberse quedado sin palabras.

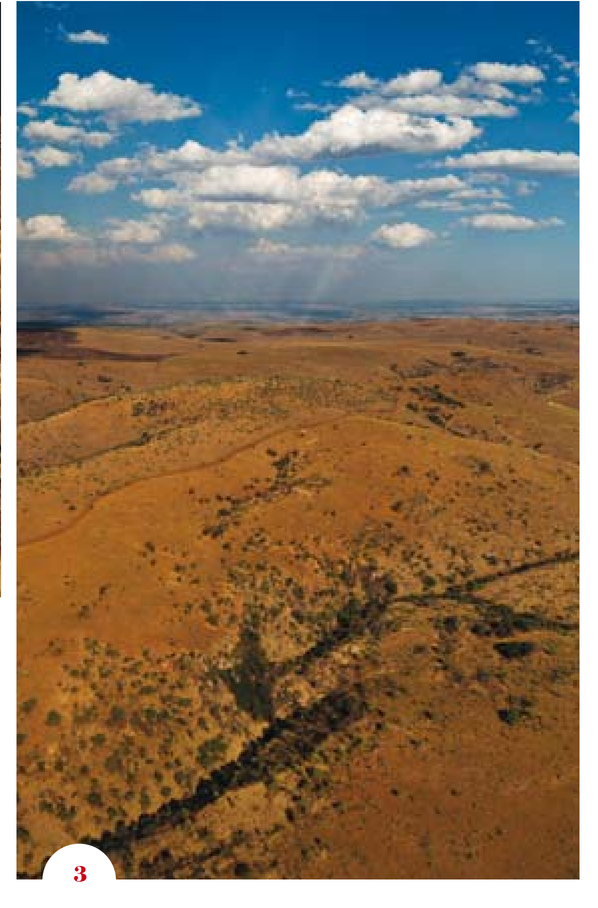
Berger sonríe. No es la primera vez que ve esta reacción. Desde que halló los fósiles en 2010, científicos de todo el mundo han ido acudiendo uno detrás de otro para quedarse boquiabiertos ante los huesos. Teniendo en cuenta la configuración peculiar de los esqueletos, el equipo de Berger los ha atribuido a una nueva especie, *Australopithecus sediba*. Además, debido a que presentan una combinación de rasgos primitivos, propios de *Australopithecus*, y otros más evolucionados, propios de *Homo*, han propuesto que la especie ocuparía un lugar privilegiado en el árbol filogenético. Correspondería al antepasado de *Homo*. La idea resulta revolucionaria. Si Berger se halla en lo cierto, los paleoantropólogos deberán replantearse dónde, cuándo y cómo apareció *Homo* y, ante todo, lo que significa ser un humano.

CAMINO SIN SALIDA

En mitad de un camino polvoriento salpicado de rocas que serpentea a través de la Reserva Natural John Nash, Berger detiene el todoterreno y señala una pequeña pista que se bifurca a la derecha. Durante 17 años ha recorrido los 40 kilómetros que hay en dirección noroeste desde Johannesburgo hacia una finca salvaje de 9000 hectáreas de propiedad privada, y siempre había pasado de largo este desvío. Siempre había seguido la pista principal, atravesando un paisaje con jirafas, búfalos y ñúes, para dirigirse a una cueva situada a pocos kilómetros de allí, Gladysvale, donde viene excavando desde entonces. En 1948, los paleontólogos estadounidenses Frank Peabody y Charles Camp acudieron a esa zona en busca de fósiles de homininos (los humanos modernos y sus antepasados extintos). Seguían el consejo del paleontólogo sudafricano Robert Broom, que había encontrado fósiles similares en las cuevas de Sterkfontein y Swartkrans, a ocho kilómetros de allí. Peabody sospechaba que Broom les había embarcado adrede en una búsqueda infructuosa, tan escaso fue el interés que le despertaron los yacimientos.

1





BRENT STIRTON, GETTY IMAGES

Lee Berger (*izquierda*) y Meshack Kgasi (*derecha*) inspeccionan el yacimiento de Malapa, donde Berger ha descubierto los fósiles de *Australopithecus sediba* (*1*). Los bloques de sedimento brechificado extraídos por los mineros se examinarán mediante tomografía para ver si contienen nuevos fósiles (*2*). Vista de los valles alrededor de Malapa, al noroeste de Johannesburgo (*3*).

Pero lo que no suponían Berger ni los que le precedieron era que ese pequeño camino a la derecha, uno de los muchos que abrieron los mineros a principios del siglo XX para transportar desde las canteras la piedra caliza con la que se construyó Johannesburgo, les conduciría a un descubrimiento irrepetible.

Berger, con 46 años de edad, nunca había imaginado realizar un hallazgo como el de *A. sediba*. Aunque pensaba que las raíces de *Homo* podrían encontrarse en Sudáfrica y no en África oriental, sabía que las posibilidades de hacer un gran descubrimiento eran bajas. Los fósiles de hominino resultan muy infrecuentes, de ahí que no albergara muchas esperanzas. Además, su trabajo se había desarrollado en la región de la Cuna de la Humanidad, una zona que ha sido explorada intensamente. Sus cuevas habían proporcionado fósiles de australopitecinos, aunque se los consideraba más alejados del género *Homo* que los restos de australopitecinos hallados en el este de África. Así que Berger trabajaba con gran esfuerzo en Gladysvale, día tras día, año tras año. Entre los millones de fósiles de animales apenas había dado con unos cuantos de hominino, en concreto, de la especie *A. africanus*. Por ese motivo, decidió centrarse en la datación del yacimiento. Una de las mayores dificultades en la interpretación de los fósiles de hominino de Sudáfrica consiste en establecer con seguridad su antigüedad. En África oriental, los fósiles se sitúan en sedimentos intercalados entre capas de cenizas volcánicas procedentes de las erupciones que cubrieron el paisaje en el pasado. Los geólogos pueden determinar la edad de una capa volcánica mediante el análisis de su composición química. Un fósil hallado en una capa de sedimento entre dos capas de cenizas posee una antigüedad intermedia a la de los dos estratos volcánicos que lo enmarcan. Pero las cuevas de la Cuna de la Humanidad no presentan cenizas volcánicas. A pesar de ello, durante los 17 años de trabajo en Gladysvale, Berger y su equipo ensayaron diferentes técnicas que les permitieran sortear la ausencia de cenizas para datar.

Las técnicas demostraron pronto su utilidad. El 1 de agosto de 2008, mientras buscaba nuevos yacimientos en una zona que había identificado con Google Earth, Berger tomó el camino de la derecha que hasta entonces había pasado de largo. Este le condujo a un hoyo de tres por cuatro metros excavado por los mineros. En una exploración superficial del yacimiento halló varios fósiles de animales, lo que le empujó a regresar otra vez para inspeccionarlo mejor. El 15 de agosto volvió con su hijo de 9 años, Matthew, y su perro, Tau. Su hijo se adentró en el bosque tras Tau y, después de unos minutos, gritó a su padre que había descubierto un fósil. Berger pensó que se trataría de algún resto sin importancia, probablemente un hueso de antílope, pero en un gesto paternal acudió a ver el hallazgo. De una roca oscura, en medio de hierbas altas y cerca del tronco de un árbol partido por un rayo, sobresalía el extremo de una clavícula.

Berger reconoció de inmediato que pertenecía a un hominino. En los meses siguientes encontró más huesos del dueño de la clavícula, además de otro esqueleto parcial, a 20 metros de la cantera. Hasta la fecha, Berger y su equipo han recuperado del yacimiento más de 220 fósiles de *A. sediba*, una cantidad superior al total de huesos que se conocen de los primeros *Homo*. Bautizó el yacimiento con el nombre de Malapa, que significa «hacienda» en la lengua local Sesotho. Con los métodos de datación empleados en Gladysvale, los geólogos del equipo de Berger determinaron la edad de los restos en 1,977 millones años, con un margen de error de 2000 años.

UN ANTEPASADO EN MOSAICO

El hecho de que los fósiles de Malapa incluyan numerosas partes anatómicas nos ofrece una información excepcional sobre el orden de aparición de los rasgos fundamentales de *Homo*. Se ha deducido así que las características distintivas humanas no surgieron todas a la vez, tal y como se pensaba. Fijémonos en la evolución de la pelvis y del cerebro. Las ideas tradicionales sostenían que la pelvis ancha y plana de los australopitecinos había evolucionado hacia la pelvis de *Homo*, en forma de cuenco, para permitir el nacimiento de crías con un mayor tamaño craneal. Pero la amplia vía del parto en la pelvis de *A. sediba* se asemeja a la de *Homo*, aunque tal rasgo va unido a un tamaño cerebral reducido, de unos 420 centímetros cúbicos (un tercio del nuestro). Esta combinación significa que, en el linaje de *A. sediba*, el mayor tamaño del cerebro no habría promovido la transformación de la pelvis.

La mezcla de rasgos antiguos y modernos en *A. sediba* no solo afecta a las características generales como el tamaño cerebral y la forma de la pelvis. La pauta se repite en niveles más profundos, igual que un fractal evolutivo. El análisis del interior de la cavidad craneal del macho joven demuestra que el cerebro, aunque de pequeño tamaño, poseía un mayor lóbulo frontal, lo que indica una reorganización avanzada de la materia gris. Los huesos de la extremidad superior de la hembra adulta revelan la combinación de un brazo largo (un rasgo primitivo heredado de un antepasado arborícola) con unos dedos cortos y rectos adaptados a la fabricación y utilización de herramientas (aunque las inserciones musculares en los huesos indican una capacidad de prensión similar a la de los simios). En algunos casos, la yuxtaposición de caracteres primitivos y avanzados es tan extraña que, si los huesos no hubiesen aparecido juntos, seguramente se habrían adjudicado a especies distintas. Según el miembro del equipo Bernard Zipfel, de la Universidad de Witwatersrand, el pie reúne un calcáneo similar al de los simios y un astrágalo que recuerda al de *Homo*.

Para Berger, el mosaico de rasgos tan extraordinario de *A. sediba* constituye una lección para los paleoantropólogos. De haber hallado alguno de los fósiles de forma aislada, él mismo los habría clasificado en diferentes especies. Tal vez habría asignado la pelvis a *Homo erectus*, el brazo a un simio y el astrágalo a un humano moderno. Como en la parábola en la que unos ciegos estudian las diferentes partes de un elefante, habría estado equivocado. Berger afirma que con el ejemplo de *A. sediba* se demuestra la inexactitud de atribuir huesos aislados a un género. De este modo, según su punto de vista, no se puede asegurar que el maxilar de 2,3 millones de años hallado en Hadar (Etiopía), considerado el resto más antiguo de *Homo*, pertenezca en realidad al linaje de *Homo*.

Si se excluye ese maxilar, los restos de *A. sediba* son más antiguos que cualquier fósil datado de *Homo,* pero más modernos que los de *A. afarensis*. Por tanto, el equipo de Berger piensa que esa posición le convierte en un candidato óptimo para ser el último antepasado de nuestro género. Incluso, teniendo en cuenta los rasgos avanzados de *A. sediba*, podría representar el ancestro de *H. erectus* (algunos consideran que una parte de este corresponde a una especie distinta, *H. ergaster*). Frente a la idea tradicional de que *A. afarensis* dio lugar a *H. habilis* y este a su vez a *H. erectus*, Berger propone que *A. africanus* es el antepasado de *A. sediba*, y este originó a *H. erectus*.

Tal visión relegaría a *H. habilis* a una rama lateral, sin descendencia, en la familia humana. También situaría en esa línea extinta a *A. afarensis*, una especie considerada durante mucho

Rasgos combinados

Los esqueletos de *Australopithecus sediba* presentan una mezcla insólita de rasgos australopitecinos y de *Homo*. Tradicionalmente se pensaba que algunos caracteres de *Homo*, como los brazos cortos y la destreza manual, evolucionaron de forma conjunta. Pero en *A. sediba* se observa que ambos evolucionaron por separado, ya que en él se combinan unos brazos largos para trepar a los árboles con unas manos de dedos cortos y pulgar largo que le conferirían una capacidad de prensión similar a la de los humanos. La mezcla de rasgos hace pensar al equipo de Berger que *A. sediba* desciende de *A. africanus*, o de otro linaje desconocido, y que es el antepasado directo de *H. erectus*.

BRENT STIRTON, GETTY IMAGES

¿El antepasado de todos los humanos?

La hipótesis tradicional sobre el origen de *Homo* plantea que *Australopithecus afarensis* es el antepasado de *Homo habilis*, que habría evolucionado para dar lugar a *H. erectus* y a todas las especies posteriores de *Homo*. Pero algunos de los rasgos claves de la anatomía de *A. sediba*, entre ellos un talón más primitivo que el de *A. afarensis* y una mano más evolucionada que la de *H. habilis*, han llevado a proponer la idea polémica de que *A. sediba* sea antepasado de *H. erectus* y que *A. afarensis* y *H. habilis* pertenezcan a ramificaciones secundarias.

Ardipithecus
Australopithecus
Kenyanthropus
Homo
Bastante seguro
Provisional
¿Linaje no descubierto?
A. aethiopicus
A. africanus
Primer Homo
A. garhi
A. anamensis
A. afarensis
A. ramidus
K. platyops
Hace 4 millones de años (Ma)
3 Ma

tiempo la antepasada de todos los homininos posteriores, entre ellos *A. africanus* y *Homo*. Berger señala que el astrágalo de *A. sediba* es más antiguo que el de *A. afarensis*, lo que indica que *A. sediba*, o bien experimentó una regresión evolutiva y desarrolló un hueso más primitivo, o desciende de un linaje distinto del de *A. afarensis* y *A. africanus*, del que aún no se han descubierto fósiles.

Berger opina que se ha apostado demasiado alto por los fósiles hallados en África oriental. Ahora hay que reconocer la existencia de otras posibilidades que se deben explorar. Quizá la hipótesis que sitúa el origen de los humanos en África oriental (*East Side Story*) resulta errónea. La idea tradicional considera que los fósiles más antiguos de hominino hallados en Sudáfrica representan una línea evolutiva que no tuvo descendencia. Ahora, *A. sediba* podría contradecir ese planteamiento y demostrar que en Sudáfrica hubo un linaje que dio origen a los humanos actuales. De hecho, la palabra *sediba* significa «fuente» o «manantial».

Pero William Kimbel, de la Universidad Estatal de Arizona, que dirige el equipo que halló el maxilar de 2,3 millones de años en Etiopía, se manifiesta en desacuerdo. Según él, la idea de que se necesita todo un esqueleto para clasificar un fósil carece de sentido; lo fundamental consiste en identificar partes anatómicas que contengan rasgos diagnósticos. Y el maxilar de Hadar presenta características que lo relacionan con *Homo*, como la forma parabólica de la arcada dental. Kimbel, que ha visto los fósiles de Malapa, aunque no los ha podido estudiar con profundidad, admite la sorprendente semejanza de los rasgos con los de *Homo*, si bien no sabe cómo interpretarla. Pero se mofa ante la sugerencia de que puedan corresponder al antepasado de *H. erectus*. «No imagino cómo un taxón de Sudáfrica con alguna característica de *Homo* podría ser su antepasado, cuando en África oriental existe un fósil 300.000 años más antiguo que pertenece claramente al género», declara refiriéndose al maxilar de Hadar.

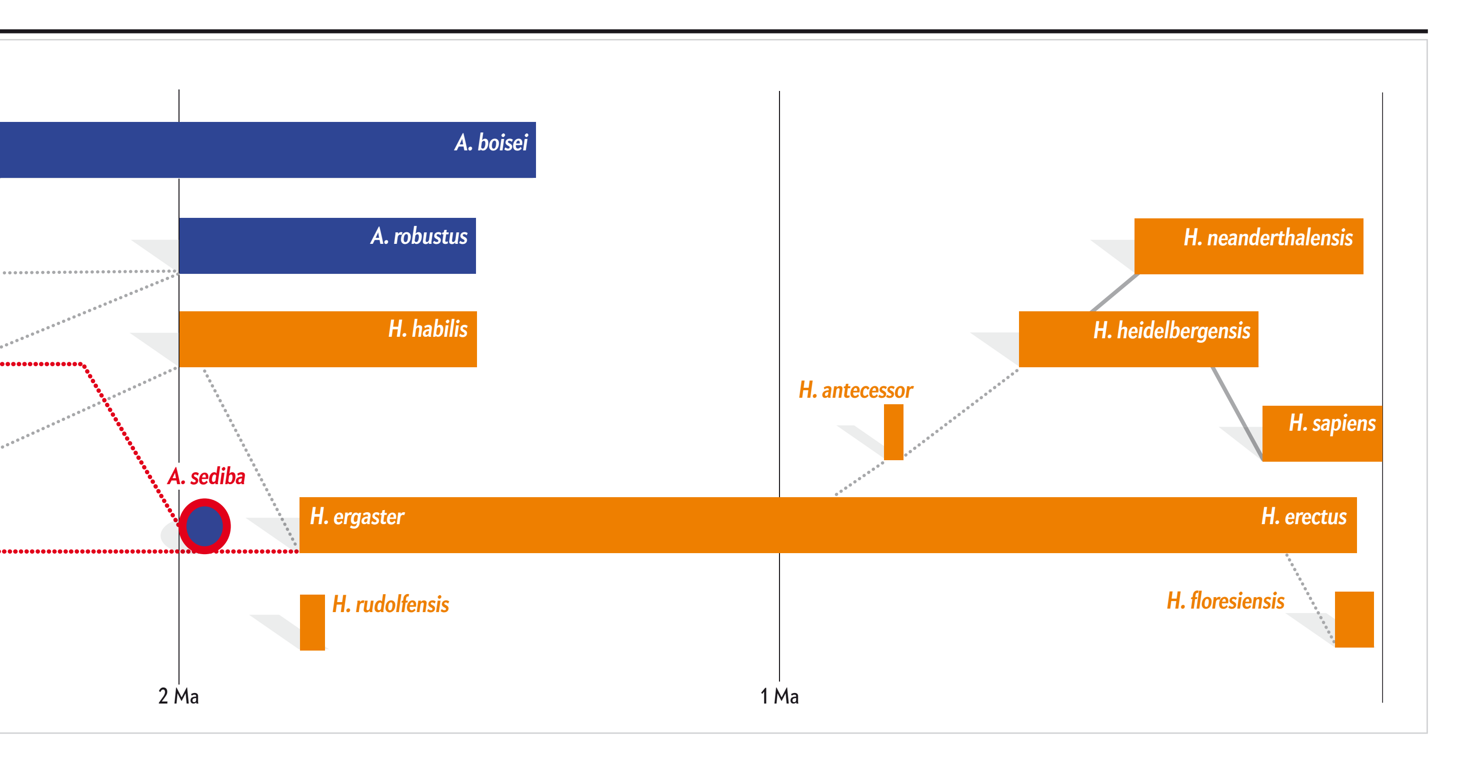
Kimbel no es el único en rechazar que *A. sediba* represente el ancestro de *Homo*. Meave Leakey, del Instituto del Lago Turkana en Kenya, que ha investigado fósiles de África oriental, apunta a la falta de concordancia entre los datos, en especial los cronológicos y los geográficos. Según ella, resulta más probable que los homininos sudafricanos constituyan una línea evolutiva independiente que se desarrolló en el sur del continente.

René Bobe, de la Universidad George Washington, afirma que si los fósiles de *A. sediba* fueran más antiguos, de unos 2,5 millones de años de edad, se podría aceptar que se trata del ancestro de *Homo*. Pero con 1,977 millones de años, poseen una morfología general demasiado primitiva como para corresponder a los antepasados de los fósiles identificados en los alrededores del lago Turkana, de una edad ligeramente inferior pero con numerosos rasgos indiscutibles del género *Homo*. Berger responde que *A. sediba* seguramente ya existía como especie antes que los individuos de Malapa. Pero Bobe y otros mantienen que no se dispone de ninguna información en ese sentido. Según él, los paleoantropólogos tienden a pensar que sus hallazgos ocupan una posición clave en el árbol filogenético de los homininos, pero la mayoría de las veces no es así. Desde un punto de vista estadístico, si África albergó diferentes poblaciones de homininos que evolucionaron de distinto modo, ¿por qué el fósil que alguien encuentra debe ser el antepasado común?

Wood, en cambio, apoya las ideas de Berger. En especial, cuando afirma que el hallazgo de *A. sediba* nos enseña que los huesos aislados no permiten predecir el resto del esqueleto y que la combinación de rasgos en fósiles anteriores no hacen descartar otras posibilidades. Pero rechaza que *A. sediba* sea el antepasado de *Homo,* por presentar escasos caracteres que lo relacionen con él. Opina que los rasgos de *A. sediba* pudieron evolucionar de forma independiente del linaje de *Homo*. Según él, *A. sediba* debería haber cambiado mucho para convertirse en *H. erectus*.

La respuesta a la cuestión de si *A. sediba* pertenece a nuestra línea evolutiva se ve obstaculizada por la falta de una clara definición del género *Homo*. Pero llegar a un consenso entraña mayor dificultad de lo que parece. Debido a la escasez de fósi-

JEN CHRISTIANSEN



les de ese período de transición, la mayoría de ellos muy fragmentarios, resulta complicado determinar los primeros rasgos de *Homo* que lo diferenciaron de sus antepasados australopitecinos, los cambios que lo hicieron humano. Los esqueletos de Malapa ponen de manifiesto un hecho desconcertante: al ser mucho más completos que cualquier fósil de los primeros *Homo*, se hace muy difícil compararlos con ellos. Berger afirma que *A. sediba* nos obligará a establecer una definición.

TODO EN LOS DETALLES

Sea cual sea la posición evolutiva de los fósiles de Malapa, sin duda permitirán confeccionar el retrato más completo de los homininos más antiguos, en parte, gracias al hecho de contar con varios individuos. Además de los dos esqueletos parciales de un macho joven y de una hembra adulta, el equipo de Berger ha recuperado huesos de al menos otros cuatro individuos, entre ellos una cría. Un hecho destacable, si se tiene en cuenta la escasez de datos poblacionales en el registro fósil humano, a lo que se añade el magnífico estado de conservación de los restos. Se han desenterrado huesos que no suelen sobrevivir a los estragos del tiempo: una escápula del grosor de una hoja de papel, una delicada primera costilla, huesos de dedos del tamaño de guisantes y vértebras con apófisis conservadas. Y varios huesos de los que antes solo se disponía de fragmentos aparecen aquí íntegros. Antes del descubrimiento de Malapa, no se había identificado ningún brazo entero de los primeros homininos. Por tanto, todas las longitudes de las extremidades utilizadas para interpretar aspectos esenciales como la locomoción se basaban en estimaciones. Incluso a Lucy, el esqueleto de hominino más completo que se conocía desde su descubrimiento en 1974, le falta una buena parte de brazos y piernas. En cambio, la hembra adulta de Malapa conserva toda una extremidad superior, desde la escápula hasta la mano. Solo le faltan algunas falanges distales de sus dedos y huesos del carpo, aunque Berger espera poder encontrarlos. De hecho, cree que podría hallar el resto de los esqueletos cuando excave el yacimiento, ya que su equipo solo ha recuperado fósiles visibles en la superficie pero no ha buscado de modo sistemático fósiles enterrados a mayor profundidad. Con esas pruebas, y junto con otros datos, será posible averiguar el modo en que *A. sediba* se desarrollaba, la manera como se desplazaba por su entorno y la variabilidad morfológica entre miembros de la especie.

Pero no solo cabe esperar que los fósiles aporten nuevos datos. Malapa también ha proporcionado materiales que pueden ayudar a entender mejor *A. sediba.* Los paleontólogos pensaban que durante el proceso de fosilización todos los componentes orgánicos del cuerpo (la piel, el pelo, los órganos) se descomponían y desaparecían, excepto la parte mineral del hueso. Pero cuando Berger examinó el escáner tomográfico del cráneo masculino, descubrió en la parte superior un espacio vacío entre la superficie del fósil y la del hueso. Al inspeccionar el espacio de cerca distinguió un patrón superficial que recordaba a los elementos estructurales de la piel. En la actualidad está realizando análisis adicionales para saber si ese patrón tan extraño que ha hallado en el cráneo del macho, así como en el mentón de la hembra y en otros huesos de antílope del yacimiento, corresponde a piel.

Si se confirma la conservación del tejido cutáneo, podríamos averiguar el color de la piel y la densidad y características del pelo de *A. sediba.* También podría conocerse la distribución de las glándulas del sudor, un dato que permitiría deducir la capacidad de la especie para regular la temperatura corporal, lo que debió de influir sobre su actividad. Además, las glándulas sudoríparas ofrecen información sobre la evolución del cerebro. La aparición de un cerebro de mayor tamaño exigiría un mecanismo que mitigara el calor del ambiente (una característica distintiva de *Homo*), puesto que el cerebro es un órgano muy sensible a los cambios de temperatura. Si se conserva material orgánico, Berger podría incluso obtener ADN de los restos. Hasta ahora, el ADN de hominino más antiguo que se ha secuenciado tiene 100.000 años de antigüedad y pertenece a un neandertal. Pero debido a las condiciones de conservación excepcionales en Malapa, Berger alberga la esperanza de recuperar datos genéticos de



El escáner del cráneo del macho joven, realizado con radiación de sincrotrón, permite reconstruir con detalle el cerebro (*rosa*). Aunque su tamaño apenas supera el de un chimpancé, presenta una reorganización avanzada de los lóbulos frontales.

CORTESÍA DE PAUL TAFFOREAU, ESRF

los fósiles de *A. sediba*. De ser así, se podría determinar si la hembra adulta y el macho joven fueron madre e hijo, tal y como se ha propuesto, así como su relación con los individuos restantes del yacimiento. Además, tal descubrimiento motivaría la búsqueda de ADN en otros yacimientos y, si esta resultara fructuosa, podría zanjarse el debate sobre el parentesco entre las diferentes especies de homininos.

La conservación de restos orgánicos constituiría un hecho único en la paleontología de los homininos. Y el equipo de Malapa sabe que para convencer a la comunidad científica necesitará pruebas extraordinarias. Pero los primeros resultados analíticos apoyan esa hipótesis, y Berger piensa que muy probablemente los futuros análisis la confirmarán. De hecho, se han identificado restos orgánicos semejantes en huesos de dinosaurios [*véase* «Fósiles con restos de vida», por Mary H. Schweitzer; Investigación y Ciencia, febrero de 2011], decenas de millones de años más antiguos que los fósiles de Malapa. Según él, los vestigios orgánicos podrían resultar más habituales de lo que pensamos; simplemente, nadie los había buscado antes.

Otro de los aspectos que nadie había examinado en un hominino de tal antigüedad es la presencia de sarro. La superficie de los dientes del macho joven muestra manchas marrones oscuras. Durante la preparación de los fósiles, se suelen limpiar los dientes para poder estudiar los restos de hominino. Pero Berger pensó que esas manchas podrían corresponder al material que los humanos de hoy eliminamos con cepillos de dientes o visitas al dentista. El sarro fósil proporcionaría una información valiosa sobre la evolución de la dieta.

Los estudios previos sobre la alimentación de los primeros humanos se basan en el análisis isotópico de los dientes. Este indica si un animal ha consumido plantas C3 (árboles o arbustos) o plantas C4 (hierbas y gramíneas). O señala si una especie

carnívora consumía animales que a su vez comían esas plantas, o una combinación de ambos alimentos. Tales pruebas son indirectas e inespecíficas. En cambio, el sarro constituye un resto de la comida por sí mismo. En la actualidad, el equipo está estudiando los fitolitos presentes en el sarro. Los fitolitos son cristales de sílice que forman los vegetales y que resultan específicos para cada planta. El estudio de los fitolitos puede revelar las plantas que un animal consumió antes de morir. De los análisis de isotópos, fitolitos y marcas de desgaste dentario de *A. sediba* (que permitirán saber si consumía alimentos duros o blandos en las semanas que precedieron a su muerte) se obtendrá una información muy valiosa sobre su forma de subsistencia. Además, como se dispone de individuos con diferentes estadios de desarrollo, se podrá averiguar la alimentación de las crías y de los adultos.

En un artículo de revisión publicado en *Science* el pasado octubre, Peter S. Ungar, de la Universidad de Arkansas, y Matt Sponheimer, de la Universidad de Colorado en Boulder, destacaban que los últimos estudios habían revelado una diversidad y complejidad inesperada en la dieta de nuestros antepasados. Mientras que *Ardipithecus ramidus*, uno de los candidatos a ser el hominino más antiguo, consumía alimentos C3, igual que los chimpancés, otros homininos africanos parecían decantarse por una mezcla de C3 y C4. Según el estudio de Thure Cerling, de la Universidad de Utah, y sus colaboradores, publicado hace un año en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, la especie *Paranthropus robustus* ingería sobre todo alimentos C4. Se esperan con impaciencia los resultados sobre el tipo de dieta que seguía *A. sediba* y si estos encajan con los datos paleoambientales de Malapa, que señalan una abundancia de pastos y de árboles. Quizás el tipo de dieta arroje luz sobre la forma en que *A. sediba* utilizaba sus manos hábiles, adaptadas para el empleo de instrumentos, y si sus largos brazos, semejantes a los de los simios, le servían para trepar y alimentarse en los árboles.

LOS ÚLTIMOS MOMENTOS

Los homininos de Malapa habrían tenido un final sombrío. Posiblemente una sequía les hiciera difícil abastecerse de agua. Berger piensa que, empujados por la sed, habrían intentado descender entre 30 y 50 metros en la caverna de Malapa en busca de alguna fuente para beber y, al hacerlo, hallaron la muerte. Tal vez el joven cayó primero y la hembra adulta, quizá su madre, trató de rescatarlo pero cayó también. Otros animales, como antílopes o cebras, alcanzaron el mismo destino y quedaron sepultados junto a los homininos para la posteridad.

Curiosamente, los datos geológicos del yacimiento indican que la asociación fósil de Malapa se formó justo en el momento en que se producía un cambio paleomagnético en la Tierra (una inversión en la polaridad del planeta en que se intercambian las posiciones de los polos norte y sur magnéticos). Esa coincidencia plantea la cuestión de si el fenómeno influyó de alguna manera en la muerte de estos individuos.

Se sabe muy poco sobre la causa de esos cambios magnéticos y si provocan alteraciones ambientales. Algunos geólogos sugieren que habrían generado estragos ecológicos al modificar el campo magnético que protege a los organismos de la radiación externa o al confundir los sistemas de navegación interna que utilizan las aves migratorias y otros animales que se orientan con el campo magnético terrestre. Malapa es uno de los pocos yacimientos en el mundo que registra un cambio paleomagnético y a la vez presenta un conjunto de fósiles de animales de ese momento, lo que podría ofrecer una información singular sobre lo que sucede en el planeta cuando los polos magnéticos se intercambian.

Otros indicios tal vez ayuden a conocer mejor el modo en que perecieron los individuos de Malapa. Los huesos fósiles de una hembra de antílope que se hallaba preñada en el momento de morir podrían indicar la época del año en que sucumbieron los homininos con un margen de error de pocas semanas, ya que los antílopes paren a sus crías en un corto período de la primavera y el análisis de los huesos del feto permitiría conocer su tiempo de gestación. Las huellas de actividad de gusanos y escarabajos necrófagos podrían revelar también si los cuerpos de los homininos quedaron expuestos a la intemperie antes de ser enterrados por los sedimentos de la cueva.

De alguna forma, el trabajo en *A. sediba* no ha hecho más que empezar. El pasado noviembre, en un viaje a Malapa en la primavera austral, Berger mostraba a los visitantes la tierra pedregosa entre el árbol donde su hijo encontró la clavícula y el hoyo donde Berger hizo su hallazgo. Mientras descendía al hoyo, señalaba los pequeños fragmentos de huesos que todavía asoman en las rocas a la espera de ser excavados. Los sorprendidos visitantes se aproximaban para ver el hueso del brazo de un individuo infantil, una mandíbula de un tigre de dientes de sable y la zona que tal vez contenga el resto del esqueleto del macho joven. Solo con los restos desenterrados por los mineros y las lluvias, el equipo ha reunido el mejor conjunto de fósiles de hominino que se conoce. Cuando los investigadores excaven los aproximadamente 500 metros cuadrados del yacimiento, Berger no duda de que identificarán muchos más fósiles. Se prevé construir una estructura que proteja el yacimiento de las inclemencias meteorológicas y que sirva como laboratorio de campo. A finales de año se iniciará la excavación sistemática y se podrá trabajar en los depósitos no alterados por los mineros. Mientras tanto, en el laboratorio de la Universidad de Witwatersrand, los bloques de roca arrancados durante la explotación aguardan ser abiertos para desvelar sus secretos. Se están realizando tomografías para estudiar su contenido y descubrir fósiles de hominino, entre ellos el cráneo aún no encontrado de la hembra adulta.

Malapa es un yacimiento tan rico que Berger quizá dedique a él el resto de su carrera. Pero también está pensando en el próximo paso. *Australopithecus sediba* le ha hecho comprender la necesidad de obtener un mejor registro fósil. Los trabajos de prospección que le llevaron a descubrir Malapa le permitieron identificar en la Cuna de la Humanidad más de treinta yacimientos nuevos que podrían albergar fósiles de hominino. Está organizando un equipo que excave los lugares más prometedores. Incluso tiene la vista puesta en zonas más alejadas. Otras regiones de Congo y Angola poseen formaciones kársticas, semejantes a las de la Cuna, en las que nunca se han buscado fósiles de hominino. Quizás allí, en esa tierra desconocida de la paleoantropología, podría dar con otras pistas inesperadas del amanecer de la humanidad que obliguen a rescribir la historia de nuestros orígenes.

PARA SABER MÁS

***Australopithecus sediba*: A new species of *Homo*-like australopith from South Africa.** Lee R. Berger y otros en *Science*, vol. 328, págs. 195-204, 9 de abril de 2010.

En el número de *Science* del 9 de septiembre de 2011 se publicaron cinco artículos que estudian en detalle la anatomía y la cronología de *A. sediba*.

Gerhard Samulat es físico y periodista científico.



ENERGÍA

El futuro de la energía eólica

El sector eólico está experimentando un enorme crecimiento en todo el mundo. No obstante, para que pueda vertebrar una solución global será necesario idear sistemas de almacenamiento y una red de transporte eficiente

Gerhard Samulat

Según un estudio dirigido en 2009 por Michael B. McElroy, profesor de estudios ambientales en la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de Harvard, una instalación adecuada de aerogeneradores en todo el mundo podría suministrar una cantidad de energía 40 veces superior a la demanda global. Su cálculo consideraba la construcción de parques eólicos en regiones del planeta donde no causarían perjuicio ecológico. Suponía, además, que los aerogeneradores serían de tamaño mediano (con una potencia nominal de 2,5 megavatios) y que se encontrarían detenidos el 80 por ciento del tiempo. Hoy, el mayor aerogenerador comercial del mundo, el modelo E-126 de la compañía alemana Enercon, cuenta con una potencia nominal de 7,5 megavatios, lo suficiente para abastecer a unos 10.000 hogares. Para los próximos años, los planes de la estadounidense General Electric incluyen la construcción de una turbina con componentes superconductores cuya potencia ascendería a entre 10 y 15 megavatios. Y aunque es cierto que las instalaciones eólicas permanecen inactivas la mayor parte del tiempo (en ocasiones, la tasa de utilización no llega al 20 por ciento), se trata, en cualquier caso, de un recurso energético cuyas reservas son inagotables.

EN SÍNTESIS

La energía eólica constituye uno de los sectores energéticos que más rápido ha crecido durante los últimos años. En algunos países ya cubre una fracción notable del suministro.

Según algunos estudios, este recurso podría llegar a satisfacer la demanda energética global. Su principal problema reside en la inestabilidad de la producción.

Los retos futuros incluyen instalaciones más eficientes y sistemas de almacenamiento adecuados. Para Europa, algunos expertos proponen una red eléctrica intercontinental que incluya a África.



NMEDIA/DREAMSTIME

Según los datos de la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA), una organización encargada de promover el desarrollo de esta fuente de energía, los aerogeneradores conectados hoy a la red suman una potencia instalada de 215 gigavatios y cubren en torno al 2 por ciento del consumo energético mundial. La producción eólica de electricidad representa, además, un sector económico en rápida expansión, con un crecimiento mínimo del 20 por ciento anual. Para finales de este año, la WWEA calcula un aumento de 44 gigavatios, el equivalente a la construcción semanal de un parque eólico de gran tamaño. El Consejo Global de Energía Eólica, que agrupa a la industria del ramo, pronostica que, para 2030, esta técnica de producción renovable podría cubrir entre el 25 y el 30 por ciento del consumo mundial, una conclusión similar a la que ha llegado el Departamento de Energía estadounidense. Con unos 45 gigavatios instalados, China constituye, hoy por hoy, el mayor productor de energía eólica del mundo. Le sigue EE.UU., por delante de Alemania, España e India. El mercado del gigante asiático es, además, el que está experimentando un crecimiento más rápido: a él se debe casi la mitad de la potencia que se instaló durante 2010 en todo el mundo.

TÉCNICA MILENARIA

El uso del viento como fuente de energía se remonta a la antigüedad. Se cree que hace 3500 años, en Babilonia, ya se empleaban los molinos de viento en la fabricación de harina y otros mecanismos similares para extraer agua. En 1887, el escocés James Blyth construyó la primera instalación destinada a generar electricidad. Pocos años después, el meteorólogo danés Poul La Cour sentaba las bases de la turbina de alta velocidad moderna: pocas palas de rotor que giran con gran rapidez. Hacia 1920, el físico alemán Albert Betz demostró que un aerogenerador solo puede transformar en energía útil, como máximo, un 60 por ciento (exactamente, 16/27) de la energía mecánica del viento. Para ello, el aire debe frenarse de manera uniforme sobre toda la superficie del rotor hasta aproximadamente un tercio de su velocidad original. Hoy en día, los ingenieros lo logran gracias a una sección longitudinal de las palas de rotor más delgada en su parte exterior.

A escala mundial los aerogeneradores más empleados son los de eje de rotación horizontal. Sus palas, inspiradas en las alas de los aviones, transforman el flujo de aire en un movimiento de rotación gracias a un proceso de sustentación aerodinámica. Los rotores de tres palas se han mostrado más estables desde un punto de vista mecánico, ya que sufren menos las vibraciones que sus análogos de dos o cuatro palas. Los aerogeneradores de rotación muy rápida, con dos o incluso con una sola pala, presentan una sustentación aerodinámica mucho menor, motivo por el que resultan menos eficientes. Además, la contaminación acústica provocada por las instalaciones aumenta a medida que lo hace la velocidad de las palas.

El diámetro de los rotores en las instalaciones actuales varía entre 40 y 90 metros. Por encima de esa cifra cabe mencionar el modelo E-126 de Enercon, con unos 127 metros de diámetro y una altura de buje de 135 metros. La compañía danesa Vestas, por su parte, acaba de anunciar el lanzamiento de un generador de 164 metros de diámetro. Tales dimensiones se alcanzan gracias al empleo de plásticos reforzados con fibra de vidrio, hoy comunes en la fabricación de palas de rotor. Aunque estos materiales pesan más y son algo más flexibles que los plásticos reforzados con fibra de carbono que emplean los fabricantes de aviones, resultan más económicos.

INSTALACIONES

Otros aerogeneradores

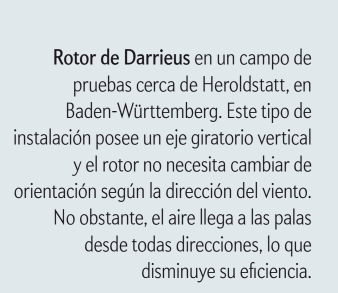
Turbinas de eje vertical

Los aerogeneradores de eje giratorio vertical cuentan con poca presencia en el mercado. De ellos, los rotores de Darrieus son los más comunes. Su ventaja reside en que presentan pocas pérdidas, aun en condiciones de viento muy turbulento; sin embargo, las palas solo adoptan una configuración óptima con respecto al flujo del aire durante un tiempo muy breve, por lo que su eficiencia apenas llega al 30 por ciento, frente al 40 o el 50 por ciento de los aerogeneradores al uso. Además, el perfil de sus alas se aparta de la dirección principal del viento, lo que puede generar vibraciones perjudiciales para la instalación.

El de mayor tamaño fue el Éole, erigido en 1988 en el parque de Le Nordais, en Canadá. Contaba con un rotor de 64 metros de diámetro y una altura de 110 metros. Hasta su cierre en 1992, tras sufrir las inclemencias de una ráfaga huracanada, rindió con una potencia nominal de 4 megavatios.

Otro tipo de aerogenerador de eje vertical, el rotor de Savonius, suele encontrarse en yates de vela, donde suministra corriente a instalaciones de radio u otros aparatos, y en los aviones, donde genera electricidad a partir del viento de cara y puede ejercer como fuente de emergencia en caso de que los motores fallen. Sin embargo, resulta poco adecuado para la producción de electricidad, debido, entre otras razones, a su baja eficiencia energética.





Rotor de Darrieus en un campo de pruebas cerca de Heroldstatt, en Baden-Württemberg. Este tipo de instalación posee un eje giratorio vertical y el rotor no necesita cambiar de orientación según la dirección del viento. No obstante, el aire llega a las palas desde todas direcciones, lo que disminuye su eficiencia.

Torres solares

El aspecto de estos dispositivos guarda semejanza con el de una torre erigida sobre un invernadero gigante. Por efecto de la irradiación solar, el aire del invernadero se calienta y asciende por la torre, donde puede alcanzar grandes velocidades. A su paso, acciona unas turbinas que generan electricidad.

A finales de los años ochenta, el ingeniero alemán Jörg Schlaich construyó en Manzanares (Ciudad Real) la primera instalación piloto. Su torre medía 195 metros de altura y el invernadero contaba con un radio de 122 metros. La instalación fue diseñada para alcanzar una potencia máxima de 50 kilovatios, aunque solo lo logró durante una breve fracción del tiempo que estuvo operativo. Por lo demás, la instalación funcionó casi sin incidencias durante varios años, con una disponibilidad de más del 95 por ciento.



Representación artística de una torre solar. Estas instalaciones son muy elevadas, ocupan áreas muy extensas y su construcción es costosa, pero pueden llegar a generar electricidad a precios económicos.

Para que una instalación llegase a los 200 megavatios, la torre debería medir un kilómetro y el invernadero debería alcanzar los 3,5 kilómetros de diámetro, lo que dispararía los costes de inversión. No obstante, el precio de la generación de electricidad en torres solares de este tamaño sería probablemente menor que en una central termosolar de eficiencia equiparable. Según las estimaciones actuales, ascendería a unos 8 céntimos por kilovatio hora; los concentradores o las torres termosolares de receptor central elevan los costes a entre 15 y 23 céntimos. Además, dado que el suelo almacena calor, las torres solares pueden generar electricidad hasta bastante más tarde de la puesta de sol e incluso durante la noche.

Hace poco, China puso en funcionamiento su primera torre solar, con una potencia de 200 kilovatios. En Namibia se construirá una instalación de 400 megavatios, con 38 kilómetros cuadrados de área de invernadero y una torre de 1500 metros. Otros proyectos se hallan en curso en EE.UU. y España.

Torres de convección

Las torres de convección, también denominadas torres energéticas, guardan cierta semejanza con las solares pero prescinden del invernadero, que en las segundas puede llegar a dar cuenta del 80 por ciento de los costes de construcción. En su lugar, se rocía agua desde lo alto, lo que enfría el aire, aumenta su densidad y provoca que caiga. Al pie de la torre se disponen turbinas que se accionan al paso del flujo de aire descendente. Una torre de 1200 metros de altura y un diámetro de 400 metros debería alcanzar una potencia de 900 megavatios. Aproximadamente un tercio de la energía eléctrica generada debe reinvertirse de inmediato para asegurar el funcionamiento de las bombas que elevan el agua hasta la parte superior.

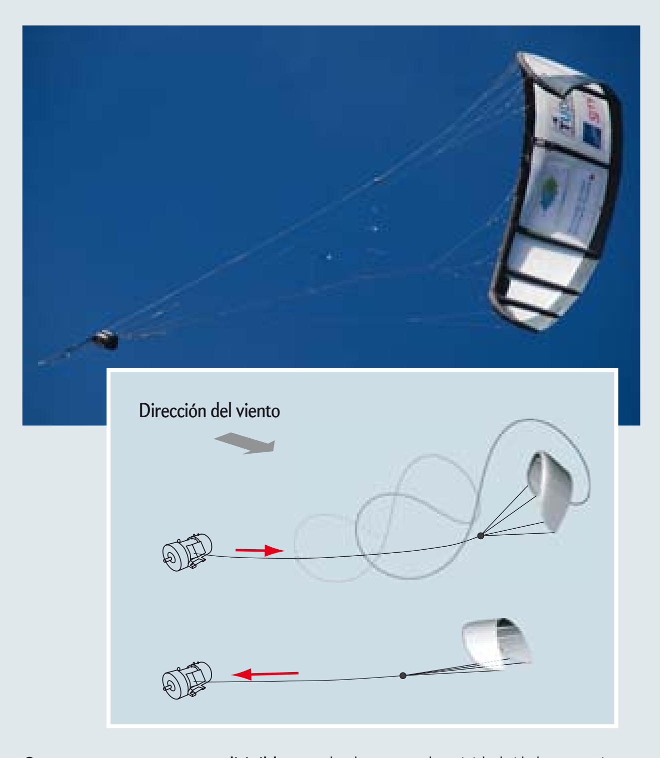
Las zonas desérticas se perfilan como las mejores ubicaciones para este tipo de instalaciones. Dado que, además, numerosos desiertos lindan con el mar (como el Sáhara, Namib o Atacama), contarían con una reserva suficiente de agua. Estas instalaciones pueden operar tanto de día como de noche con una potencia relativamente equilibrada.

Aunque no existen todavía instalaciones piloto de este tipo, en EE.UU. e Israel se están realizando trabajos preparatorios. Los expertos calculan que el precio de generación de electricidad ascendería a unos 2,5 céntimos por kilovatio hora, una cifra razonable en comparación con otros métodos.

Cometas dirigibles y parapentes

También con la ayuda de cometas dirigibles a gran altura o con parapentes, de los que ya hay prototipos, puede obtenerse energía. Una vela, unida a una cuerda de gran longitud, se eleva en el aire describiendo movimientos helicoidales. Al desenrollarse, la soga propulsa un generador. Cuando se ha extendido por completo, el ángulo de vuelo puede modificarse para que volver a enrollarla requiera menos trabajo, de lo que resulta una ganancia neta de energía. Cometas con una superficie de 14 metros cuadrados adquieren una potencia de tracción de 20 kilovatios, parte de la cual puede emplearse para generar energía útil. En una vela de la empresa SkySails, que cuenta con una superficie de 320 metros cuadrados y que se emplea para arrastrar barcos, la potencia supera los 2 megavatios. Algunos expertos han propuesto que se eleven enjambres de velas.

Se han planificado altitudes de vuelo de varios cientos de metros, ya que a esas cotas el viento sopla con mayor constancia. Las cometas dirigibles y los parapentes gozan de unos costes de construcción y de mantenimiento mucho menores que los parques eólicos, según un estudio holandés. Varias estimaciones arrojan costes de generación de corriente de entre 2 y 4 céntimos por kilovatio hora, considerablemente menos que los aerogeneradores. Otra ventaja de estos dispositivos reside en su movilidad y en el poco espacio que ocupan. Sin embargo, no pueden operar en condiciones de tempestad o tormenta. En 2013 probablemente se lanzará una primera instalación al mercado, con una potencia de un megavatio.



Con parapentes y cometas dirigibles puede obtenerse electricidad. Al elevarse, siguen una trayectoria helicoidal y tiran de una cuerda que acciona una turbina. Pueden recuperarse con un menor aporte de trabajo, de lo que resulta una ganancia energética neta (*esquema*).

W. WACKER/DOMINIO PÚBLICO (*rotor de Darrieus*); SCHLAICH BERGERMANN SOLAR, STUTTGART/WWW.SOLAR-UPDRAFT-TOWER.COM (*torre solar*); TU DELFT, ASSET (*cometa dirigible y esquema*)

LA SITUACIÓN EN ESPAÑA

Energía eólica marina

¿Una opción de futuro?

LAURA CASTRO SANTOS Y VICENTE DÍAZ CASAS

España es el cuarto productor mundial de energía eólica por detrás de EE.UU., China y Alemania. A finales de 2010, los parques eólicos operativos en nuestro país sumaban una potencia nominal de 20 gigavatios (el 20 por ciento de la potencia total instalada) y generaron el 16 por ciento de la demanda de ese año.

En consonancia con las directrices de la Unión Europea en materia energética, el Informe de Previsión del Plan de Energías Renovables 2011-2020 calcula que, para 2020, un 22,7 por ciento de la aportación al consumo final bruto en España deberá provenir de fuentes renovables. Dada la actual saturación eólica de las zonas terrestres, una opción para ampliar ese suministro en el futuro reside en la energía eólica marina. En el mar existen menos limitaciones sobre el tamaño del aerogenerador, lo que posibilita la construcción de instalaciones más potentes.

España no cuenta en la actualidad con ninguna central marina. A fin de evaluar las posibilidades de su implantación, el Gobierno elaboró en 2009 un mapa sobre la aptitud de las diferentes regiones costeras. Dicha clasificación distingue entre zonas aptas, zonas de exclusión (debido a posibles perjuicios ambientales o a la incompatibilidad de una central eólica con otros fines, como actividades pesqueras o tráfico portuario) y zonas con condicionantes (aquellas en las que deberá profundizarse en la evaluación del impacto).

En la actualidad existen parques eólicos marinos en otras regiones europeas, como el mar del Norte, los cuales se encuentran cimentados en el lecho marino a profundidades bajas. En nuestro país, sin embargo, las aguas más aprovechables son las del Cantábrico y las del Atlántico, donde la profundidad del suelo crece con rapidez a pocos kilómetros de la costa. Por ello, una alternativa la proporcionan las plataformas flotantes, una técnica que aún se encuentra en fase de desarrollo. En la actualidad existen solo dos experiencias piloto de este tipo en el mundo: Hywind, en Noruega, y Windfloat, en Portugal. Estas fueron instaladas en 2009 y 2011, respectivamente, por lo que aún no existen datos definitivos que permitan evaluar su funcionamiento.

Desde un punto de vista económico, sin embargo, hoy por hoy se desconoce la viabilidad de un parque marino con plataformas flotantes. Ello se debe, sobre todo, a los costes de fabricación, a las dificultades que ocasiona el transporte eléctrico y a la necesidad de buques especializados para su mantenimiento. Por ello, nuestro grupo de investigación trabaja en estos momentos en el diseño de sistemas de amarre y anclaje para parques flotantes, así como en la determinación de los principales factores que intervienen en el coste final. Sin duda, lograr que la energía eólica marina se convierta en una opción energética viable requerirá la participación de varios ámbitos técnicos, científicos y socioeconómicos.



DE: «ESTUDIO ESTRATÉGICO AMBIENTAL DEL LITORAL ESPAÑOL PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS MARINOS», MINISTERIOS DE INDUSTRIA Y MEDIO AMBIENTE, ABRIL DE 2009

Laura Castro Santos y Vicente Díaz Casas pertenecen al Grupo Integrado de Ingeniería de la Universidad de La Coruña

La mayoría de las veces, las palas de los rotores se construyen acoplando dos vainas exteriores. Para estabilizarlas, en su interior se acomodan largueros y nervaduras de refuerzo. Parte del trabajo ha de realizarse a mano, si bien otras fases de la producción se hallan automatizadas. Las palas incorporan a menudo un mecanismo calefactor, a fin de evitar la congelación cuando arrecian el frío y la humedad. Como cabría esperar, parte de los esfuerzos del sector siguen orientándose hacia el perfeccionamiento de algunos aspectos técnicos, como la obtención de mejoras aerodinámicas o palas más ligeras. Por ejemplo, en fecha reciente se ha comprobado que reducir la sección en el área central de la pala conlleva ventajas aerodinámicas.

ASPECTOS AMBIENTALES

Los parques eólicos reciben frecuentes críticas debido al intenso ruido que provocan. No sorprende, por tanto, que una de las principales mejoras buscadas por los fabricantes consista en diseñar palas más silenciosas. Para conseguirlo, puede reducirse el número de revoluciones por minuto de los rotores hasta que giren en «modo susurro». Otra crítica procede de las molestias visuales; en particular, de la sombra intermitente proyectada por los aerogeneradores, que puede afectar a hogares sitos a algunos kilómetros de distancia. En Alemania, la ley prohíbe que este fenómeno perjudique a una residencia habitada durante más de media hora al día y 30 horas anuales.

La construcción de centrales eólicas marinas genera asimismo un intenso ruido. Durante la instalación de los cimientos en el fondo marino pueden llegar a superarse los 200 decibelios, una cifra que supera con mucho el límite de dolor. Por lo general, las obras suelen comenzar con una baja intensidad de impactos sobre el fondo marino para que los animales puedan alejarse a tiempo. Actualmente se investigan alternativas más silenciosas, como el taladro o la perforación por agua. En un futuro quizá pueda renunciarse a enterrar cimientos descomunales en el fondo del mar: algunas compañías ya desarrollan instalaciones flotantes que pueden anclarse en el lugar deseado. Estas podrían, además, operar en zonas de aguas profundas donde soplen vientos muy intensos.

También en tierra firme los aerogeneradores pueden resultar peligrosos para la fauna, pues aves y murciélagos se estre-

llan con frecuencia contra las palas de los aerogeneradores. Los estudios al respecto son incompletos y aportan datos muy diversos: mientras que en algunos parques no se registra ningún choque, a otros se les atribuye la muerte de unas 50 aves por año y aerogenerador. En 2004, un estudio de la Asociación Alemana para la Protección de la Naturaleza (NABU) cifró en 200.000 la cantidad de pájaros que perecen cada año. Por otro lado, el número de aves que fallecen anualmente como consecuencia del tráfico rodado o las líneas de alta tensión asciende a entre cinco y diez millones, según estimaciones de la Liga Alemana para la Protección del Medio Ambiente y la Naturaleza (BUND). Los murciélagos, por su parte, pueden sufrir un accidente aun sin estrellarse contra los aerogeneradores, ya que pueden ser víctimas de un barotraumatismo provocado por las diferencias de presión que tienen lugar en las zonas cercanas a los extremos de las palas.

RENDIMIENTO

Como toda máquina, los aerogeneradores nunca llegan al máximo de su rendimiento teórico (el límite de Betz). Su eficiencia energética se ve mermada, entre otros factores, por la fricción del aire contra las palas y por las turbulencias que aparecen en los extremos. En las instalaciones modernas, dichas pérdidas reducen hasta el 40 o el 50 por ciento la capacidad del generador para convertir en electricidad la energía mecánica del viento. Si la densidad superficial de potencia del viento asciende a 320 vatios por metro cuadrado (algo menos de 30 kilómetros por hora), un aerogenerador moderno producirá energía eléctrica a una potencia de entre 130 y 160 vatios por cada metro cuadrado de la superficie que barren las palas de rotor. Por otro lado, la potencia de un aerogenerador aumenta con el cuadrado del radio del rotor. Esto permite, por ejemplo, compensar una caída del 10 por ciento en el rendimiento con un aumento aproximado del 5 por ciento en la longitud de las palas. Por ello, los productores tienden a fabricar máquinas cada vez mayores. La altura de la torre constituye otro factor a tener en cuenta, ya que a una mayor distancia del suelo el viento suele soplar con más fuerza y de modo más uniforme.

Pero, sobre todo, la potencia de la instalación aumenta con el cubo de la velocidad del viento, motivo por el que las compañías buscan levantar sus parques en ubicaciones muy ventosas, como las costas o mar adentro. Por lo general, el límite inferior para un funcionamiento rentable se sitúa en vientos de unos 20 kilómetros por hora (brisa moderada). No existe un límite superior claro. Las instalaciones modernas pueden cambiar la inclinación de las palas de sus rotores cuando el viento sopla con mayor intensidad, por lo que sus turbinas permanecen en un estado seguro de funcionamiento incluso durante una tormenta. En general, ajustar la inclinación de las palas constituye hoy en día el método principal para regular la potencia de las máquinas.

Según datos de Enercon, su modelo E-82 de 2,3 megavatios puede producir, dependiendo de la ubicación, entre 100 y 150 gigavatios hora a lo largo de toda su vida útil, fijada en 20 años. Esa cantidad equivale a unas 35 veces la energía necesaria para cubrir los costes de producción, montaje, operación y desmantelamiento, lo que quiere decir que el aerogenerador ha amortizado su coste energético en siete meses. Si el mismo modelo se emplaza en la costa, puede llegar a generar el equivalente a 51 veces su coste energético durante su vida útil, lo que supone un período de amortización inferior a cinco meses. Según la compañía, las emisiones de dióxido de carbono que implica levantar y operar una instalación equivaldrían a unos 6 o 9 gramos por kilovatio hora de energía producida, un valor que puede ascender hasta los 30 gramos en aerogeneradores marinos. Con todo, esta última cifra resulta unas 20 veces inferior a la emitida por la mezcla energética conectada a la red en un país como Alemania o EE.UU. Por último, los costes de inversión de una instalación eólica ascienden a unos 800 euros por kilovatio de potencia nominal instalada, una cifra similar a los de una central de carbón.

DE: «ESTUDIO ESTRATÉGICO AMBIENTAL DEL LITORAL ESPAÑOL PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS MARINOS», MINISTERIOS DE INDUSTRIA Y MEDIO AMBIENTE, ABRIL DE 2009

AMPLIACIÓN DE RENOVABLES

El papel de la energía eólica en Alemania

Alemania ya cubre en torno a un diez por ciento de sus necesidades energéticas gracias al viento. A finales de 2010, los aerogeneradores en funcionamiento sumaban cerca de 22.000. A pleno rendimiento, dichas instalaciones podrían generar una potencia de 27 gigavatios, una cifra cercana a las necesidades mínimas del país, cuyo consumo oscila entre 30 y 80 gigavatios. Aunque jamás se da la circunstancia de que todos los generadores funcionen al tiempo, los planes del Gobierno alemán contemplan que, para 2020, la potencia instalada de centrales eólicas y fotovoltaicas sume 98 gigavatios. De ellos, aproximadamente la mitad provendrían de aerogeneradores. Tales números alientan la posibilidad de que, en un futuro, la producción eólica y fotovoltaica cubra por completo la demanda energética del país.

Aunque 2010 fue un año muy poco ventoso en Alemania, más de un tercio de la energía eléctrica procedente de fuentes renovables tuvo su origen en los parques eólicos. Esta primacía de la generación eólica en el parque de renovables presenta visos de mantenerse también en el futuro, dado que el Gobierno pretende fomentar también la construcción de instalaciones marinas. Se prevé que, en 2030, estas aporten la misma potencia que los aerogeneradores situados actualmente en tierra firme.

Hoy, el precio de la electricidad de origen eólico asciende en Alemania a 6,4 céntimos por kilovatio hora, una cifra que, en condiciones óptimas de viento, puede rebajarse hasta los 4,5 céntimos. En ocasiones, el exceso de producción eólica ha llegado a situar el precio bajo cero. Según los cálculos de la Sociedad Fraunhofer, cada megavatio hora de electricidad de origen eólico evita la emisión de una tonelada de dióxido de carbono. Si extrapolamos ese dato a la producción total del sector en Alemania, obtenemos una reducción de unos 32 millones de toneladas de dióxido de carbono al año.

ALMACENAJE

Uno de los problemas principales del que adolecen las fuentes renovables de energía es la inestabilidad de la producción. Las previsiones meteorológicas permiten pronosticar, con horas e incluso días de antelación y con una precisión que ronda el 90 por ciento, cuánta energía suministrará un parque eólico a la red. Sin embargo, siempre existen momentos imprevistos de calma en los que los aerogeneradores se detienen o tormentas repentinas que generan excedentes de energía. Estas oscilaciones suponen una carga extraordinaria para la red, ya que pro-

OPTIMIZACIÓN DE PARQUES

La unión no hace la fuerza

Aunque a menudo el todo es más que la suma de las partes, en el caso de los parques eólicos ocurre al contrario: su potencia raras veces llega al valor acumulado de la de cada uno de los aerogeneradores. La causa se halla en las turbulencias que induce cada uno de ellos sobre los demás. Las instalaciones emplazadas a sotavento deben aprovechar un viento menos intenso y, además, no giran bien en un aire agitado. Ese comportamiento provoca grandes vaivenes en la producción de electricidad. Por otra parte, las vibraciones afectan a la estructura mecánica de los aparatos, lo que repercute en una disminución de su vida útil.

Stefan Emeis, del Instituto de Tecnología de Karlsruhe, ha desarrollado un modelo para optimizar la distancia entre aerogeneradores. Aunque en una primera aproximación consideró un parque de extensión infinita, por lo que ignoró los efectos de borde, sus resultados se acercan a los valores empíricos. Según sus cálculos, la distancia mínima entre dos aerogeneradores marinos debería ascender a entre seis y diez veces el diámetro del rotor. Por regla general, en las instalaciones cercanas a la costa se deja un espacio de, al menos, cinco veces el diámetro del rotor en la dirección principal del viento, y tres veces en las demás. También la distancia entre parques eólicos próximos ha de tomarse en consideración: según Emeis, sus efectos pueden percibirse a una distancia de 20 kilómetros.

Los modelos de Emeis demuestran asímismo la importancia de las irregularidades del terreno. Cuanto más liso es, más tiempo ha de transcurrir para que el flujo de aire turbulento se normalice. Por ello, las instalaciones marinas deben espaciarse más que las emplazadas en tierra firme. «Si se instalaran turbinas marinas con la misma densidad que las terrestres, apenas gozarían de un rendimiento mayor», subraya Emeis.

En el futuro, los sistemas de dirección electrónicos deberían aumentar el rendimiento de los parques eólicos. A partir de la velocidad del viento y la de los rotores, la temperatura y la potencia de las turbinas, un modelo informático desarrollado por Siemens permite calcular el comportamiento de cada aerogenerador y los ajustes necesarios para minimizar las turbulencias. Aunque a menudo debe sacrificarse la potencia de algunos aerogeneradores, el rendimiento del conjunto aumenta. Estas medidas pueden orientarse a elevar el rendimiento energético, la duración del servicio, o a equilibrar ambos parámetros. Desde hace unos dos años, el código se encuentra sometido a una prueba de larga duración en el parque sueco de Lillgrund.

Robert W. Whittlesey, del Instituto de Tecnología de California, basa sus estudios sobre el diseño de parques eólicos en un curioso modelo: los bancos de peces. En ellos, los peces nadan de tal manera que arrastran a sus compañeros rezagados. Por ello, Whittlesey coloca los aerogeneradores a poca distancia y los hace girar por parejas en sentido contrario, de modo que se proporcionan aire mutuamente. Esta disposición no funciona con los aerogeneradores habituales. En su lugar, Whittlesey emplea rotores de Darrieus, de eje vertical. Su eficiencia es menor, pero soportan mejor las turbulencias.

Los parques diseñados por Whittlesey y su grupo han obtenido potencias de entre 20 y 30 vatios por metro cuadrado de superficie, unas diez veces más que los parques eólicos comunes. Además, incluso las turbinas de la quinta fila rendían al 95 por ciento durante la fase de pruebas. A menudo, los aerogeneradores al uso deben desconectarse en tales circunstancias. El problema con los rotores de eje vertical reside en las enormes fuerzas centrífugas y vibraciones que deben soportar, lo que hasta ahora ha limitado su uso.

ducción y demanda deben hallarse equilibradas en todo momento, bajo el riesgo de saturarla y provocar daños.

Por ello, una de las áreas más activas de la investigación en renovables busca fórmulas para almacenar los excedentes de producción, a fin de disponer de ellos con posterioridad [*véase* «Atrapar el viento», por D. Castelvecchi; Investigación y Ciencia, abril de 2012]. Uno de los métodos más empleados en Europa es el almacenaje por hidrobombeo (centrales hidroeléctricas reversibles). Sin embargo, dicha técnica no puede ampliarse con facilidad, y su capacidad actual no bastará para almacenar los excedentes futuros.

Una alternativa consistiría en emplear la electricidad sobrante para provocar electrólisis del agua y obtener hidrógeno. Después, este podría inyectarse en la red de distribución de gas. A tenor de los datos que ofrece la Asociación Alemana de Gas y Agua (DVGW), la concentración de hidrógeno permitida en la red de gas natural no debería exceder el 5 por ciento en volumen. En términos energéticos, eso equivaldría a un tercio de la producción anual de todos los aerogeneradores del país. Otra posibilidad consistiría en mezclar el hidrógeno con dióxido de carbono para fabricar metano (el principal componente del gas natural), lo que permitiría usar toda la red de distribución de gas. La eficiencia energética del proceso de transformación de electricidad en gas natural rondaría el 60 por ciento, según las estimaciones del Centro para la Investigación de la Energía Solar y el Hidrógeno (ZSW) de Baden-Württemberg. «En cualquier caso, eso sería mejor que desperdiciar la energía sobrante», explica Michael Specht, investigador del ZSW.

Por su parte, Gregor Czisch, físico experto en sistemas energéticos, aboga en favor de una red eléctrica gigante que abarque desde Escandinavia hasta Chad. Czisch considera que una red de tales características permitiría equilibrar de manera extraordinaria el consumo y la demanda. Según sus modelos de optimización, las instalaciones que mejor se integrarían en una red tal no serían los aerogeneradores, sino las torres de convección. El físico opina, además, que una *superred* euroafricana podría impulsar al mismo tiempo el desarrollo económico del continente vecino.

PARA SABER MÁS

Asociación Europea de Energía Eólica: **www.ewea.org**

Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung, kostenoptimierte Variationen zur Versorgung Europas und seiner Nachbarn mit Strom aus erneuerbaren Energien. Tesis doctoral de Gregor Czisch, 2006. **kobra.bibliothek.uni-kassel.de/handle/urn:nbn:de:hebis:34-200604119596**

Por una red eléctrica intercontinental

Gregor Czisch ha investigado las posibilidades que ofrecería una red eléctrica que uniese Europa y África. En esta entrevista explica el potencial que promete la energía eólica para Europa y sus vecinos

Entrevista realizada por Gerhard Samulat

Usted es considerado uno de los precursores del proyecto Desertec. ¿Está satisfecho con su desarrollo?
Mis análisis demostraron el sentido de una cooperación amplia como la que prevé la iniciativa Desertec [la instalación de generadores solares en el norte de África; *véase* «El futuro de la energía solar», por B. Müller; Investigación y Ciencia, mayo de 2012]. No obstante, el proyecto se centra en estos momentos en la generación solar. Según mis cálculos, la solución más rentable la aportaría la energía eólica. Esto se aplica también al norte de África, por más que intuitivamente tendamos a relacionar el desierto con el sol. Los vientos estivales africanos poseen un potencial enorme y podrían complementarse a la perfección con los vientos invernales europeos. Si se enlazasen ambas regiones, conseguiríamos una producción estable. La energía eólica puede convertirse en la mayor protagonista del suministro eléctrico del futuro.

Parece obvio que los responsables lo han visto de otro modo.
Intenté hacer énfasis en este aspecto, pero resulta evidente que cayó en saco roto. Es también desconcertante que se prevea un plazo tan largo para la reestructuración del suministro: en 2050, un 15 por ciento de la electricidad europea debería llegar de África. En mi opinión, resulta demasiado poco. El problema estriba en que la energía termosolar —hoy por hoy, la preferida por Desertec— solo crece al ritmo de unos cientos de megavatios al año. Pero la generación eólica aumenta mucho más rápido, a unos 40 gigavatios anuales. Temo que la apuesta de Desertec por la energía solar implique mantener durante largo tiempo las centrales térmicas de carbón y gas, o que incluso nos veamos obligados a construir otras nuevas.

De todas formas, ninguna reestructuración de la red será barata.
Los costes dependen en gran parte de la duración del proceso. En mi opinión, lo razonable sería un período corto; digamos, veinte años. En tal caso, las inversiones anuales ascenderían a aproximadamente el 0,6 por ciento del producto nacional bruto (PNB) de la región de suministro. Hoy Alemania gasta cada año más del 3 por ciento de su PNB en la industria eléctrica. Y, en los países desarrollados, las inversiones brutas de capital en fábricas, instalaciones técnicas, etcétera, suman entre el 15 y el 25 por ciento del PNB. La reestructuración del suministro supondría una minucia para Europa.

¿Cuánto costaría después la electricidad?
Menos que ahora. Incluso sobre la base de los precios actuales, suministrar electricidad para toda Europa a partir de fuentes renovables no llegaría a 5 céntimos por kilovatio hora. Sin duda, por debajo de lo que se paga actualmente en el mercado por la electricidad de carga base más económica. Es más, una ampliación de las renovables evitaría la necesidad de invertir más dinero en nuevas centrales de combustibles fósiles, gastos de producción e inversiones. Sin embargo, si la transición se prolonga tanto como prevé el proyecto Desertec, las consecuencias sobre el clima se nos escaparán de las manos, pues nos veremos obligados a quemar combustibles fósiles durante mucho más tiempo. Nadie puede desear tal cosa.

Pero ¿es factible el cambio a fuentes renovables de energía mientras carezcamos de técnicas de almacenamiento que nos permitan acompasar una producción oscilante a la demanda?
Si pensamos a pequeña escala, el fracaso está asegurado. En cambio, en una red extensa casi no habría excedentes. Oferta y demanda se equilibrarían a la perfección. La diferencia podría ser absorbida por las centrales hidroeléctricas y de biomasa ya



Gregor Czisch es físico y doctor en ingeniería eléctrica. Ha trabajado para el Gobierno alemán como parte del Consejo de Asesoramiento Científico sobre Cambio Climático (WGBU) y como asesor en varios ministerios, empresas y otras instituciones.

BEWAG

existentes, distribuidas también a gran escala. Que hoy debamos aminorar la velocidad de los aerogeneradores no se debe sino a una red eléctrica ineficiente. Sin ella, con los parques eólicos marinos planificados en el mar del Norte y el Báltico, el problema se acentuará aún más.

De todos modos, los aerogeneradores marinos salen mal parados en sus modelos.

Mis cálculos investigan soluciones óptimas: descartan sin piedad todo aquello que resulta demasiado caro y solo sobreviven las propuestas más razonables desde el punto de vista económico. Los parques eólicos marinos no forman parte de ellas. Solo reaparecen en los análisis si imponemos que al menos el 50 por ciento de la producción renovable provenga de instalaciones nacionales.

¿Justifica eso una ampliación a gran escala de la energía eólica en Alemania?

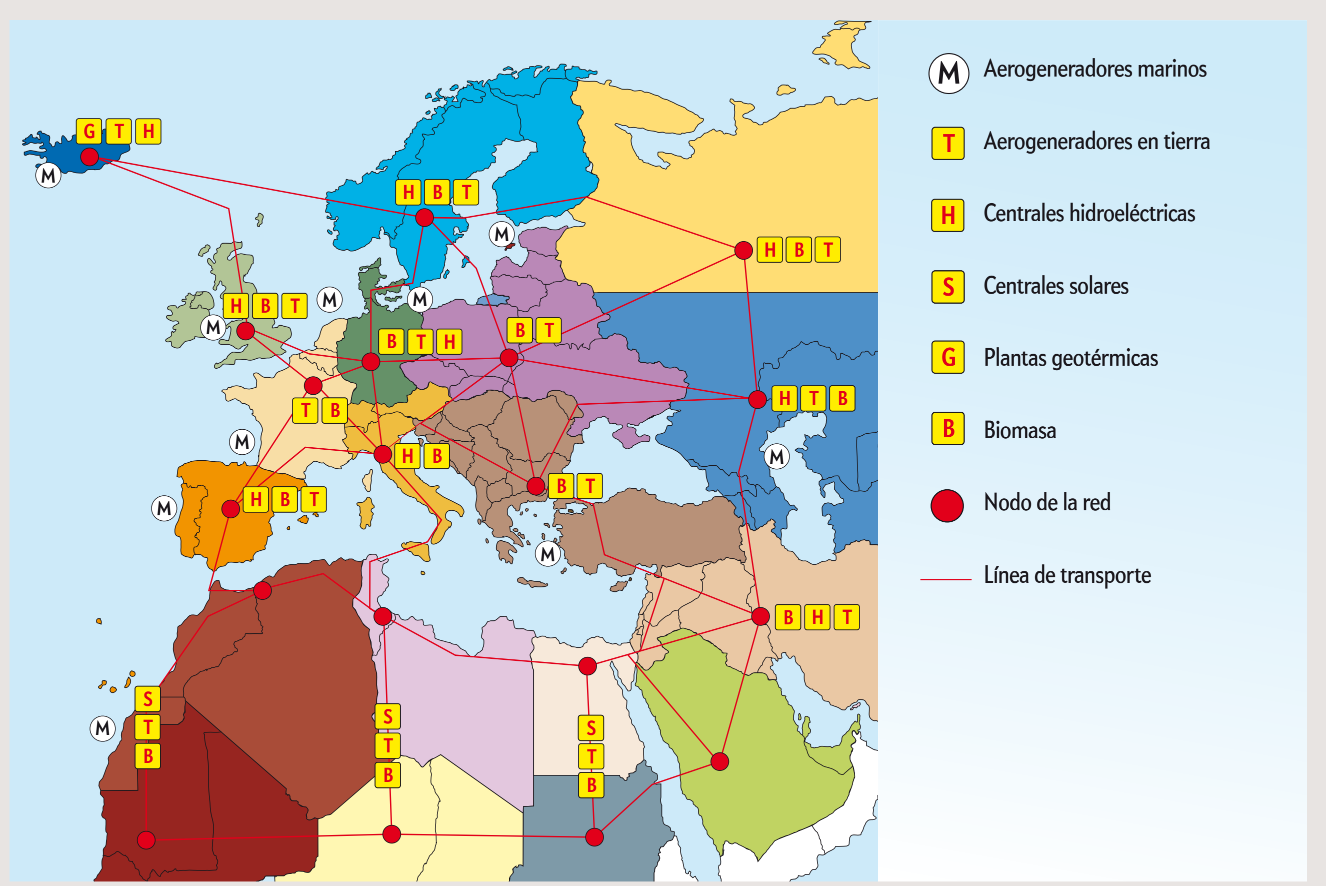
En mis modelos, Alemania desempeña más bien el papel de plataforma de transporte de electricidad. Otros países europeos y África cuentan con ubicaciones mucho más idóneas para producir electricidad. Su transporte hasta Alemania sería relativamente barato.

¿Existen proyectos similares en otras partes del planeta?

En EE.UU. ya hay expertos que consideran la cuestión. También estoy hablando con colaboradores chinos. Por supuesto, resulta más sencillo llevar a cabo un proyecto semejante en una nación extensa, tanto si se trata de ampliar la red como si debemos crear las condiciones básicas de regulación. En Europa habría llegado la hora de construir esa red. Por desgracia, los planes han quedado muy por debajo de nuestras necesidades. Incluso África ha avanzado más que nosotros. Allí existen localizaciones extraordinarias para levantar centrales hidroeléctricas, las cuales podrían producir tanta electricidad barata que ninguno de los países podría agotarla. Por ello, la mayoría de los países africanos se han unido para formar lo que ellos llaman «estanques energéticos» (*power pools*). Pero las inversiones necesarias para construir centrales y líneas de transporte sobrepasan a menudo la capacidad financiera de esas naciones. Eso es lo que ofrece la cooperación con Europa.

Así pues, ¿cree usted que una red euroafricana resultaría viable?

No es cuestión de fe, sino un hecho comprobado. Desde un punto de vista económico, la cooperación internacional tendría sentido. En la actualidad, son más bien las sensibilidades nacionales —sobre todo, en el lado europeo— y una política de clientela mal equilibrada las que están impidiendo que se den los pasos necesarios. Sin embargo, si hemos de proveernos de electricidad económica a partir de fuentes renovables, debemos desarrollar la infraestructura y las regulaciones necesarias. Nada de ello supone un problema técnico. Y la extensión de una unión intercontinental no debería hacer temer un cuello de botella en el suministro: si la energía eólica no proviene de Marruecos y Egipto, llegará de Kazajistán, del mar del Norte o de las centrales de apoyo previstas para tal fin.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/BUSKE-GRAFIK, SEGÚN GREGOR CZISCH

Redes de transporte de energía eléctrica basada en los modelos de optimización de Gregor Czisch.

por Daniel Gómez

Orquídeas del Pirineo

La cordillera alberga numerosas especies de esta familia, que destaca por sus complejas adaptaciones nutricionales y reproductoras

Las orquídeas, con alrededor de 20.000 especies, constituyen la mayor familia de plantas vasculares. Se distribuyen por casi todos los ecosistemas del planeta, salvo los desiertos extremos. La mayoría de ellas viven sobre árboles en las selvas tropicales, pero en Europa se crían en el suelo de bosques, claros de matorral y, sobre todo, en los herbazales que conforman prados y pastos. Esta familia constituye una de las ramas más evolucionadas de las plantas; presenta mecanismos sorprendentes en sus adaptaciones nutricionales y reproductoras, lo que ha atraído desde hace siglos el interés de investigadores y aficionados a la botánica.

Las flores se han transformado de forma compleja para atraer a los polinizadores con néctar rico en azúcares y llamativas modificaciones de las piezas florales. Remedan, con gran exactitud de formas y colores, insectos y otros artrópodos. Parece que algunas especies emiten también aromas similares a las feromonas sexuales de los insectos para atraer a los machos, que intentan copular sobre la flor y, de esta manera, propician el transporte del polen a las flores vecinas.

Los frutos producen abundantes y minúsculas semillas carentes de sustancias nutritivas. Su germinación depende de la concurrencia de un hongo, cuyas hifas deben alcanzar las células de la semilla y penetrar en ellas. Durante el desarrollo, la plántula puede tardar diez años o más en formar las primeras hojas verdes. A lo largo de este período, las orquídeas se alimentan del hongo que hospedan, es decir, se comportan como seres heterótrofos.

En los Pirineos se hallan unas setenta especies de orquídeas, casi la mitad de las que hay en Europa. Una decena de ellas son de una extrema rareza y, debido a su tamaño reducido y a la aparición esporádica de sus tallos aéreos, su localización entraña a menudo una gran dificultad. En la *Flora digital de Aragón* (www.ipe.csic.es/floragon) aparece información detallada sobre la ecología y distribución de estas plantas.



Neottia nidus-avis vive en ambientes forestales muy sombríos. Carece de clorofila y se alimenta de los hongos que hospedan sus raíces, cuya forma de crecimiento, semejante a un nido de ave, da nombre a la especie.



Nigritella gabasiana. Algunas orquídeas producen semillas sin la previa fecundación de sus óvulos. Esta capacidad las faculta para colonizar ambientes con escasez de polinizadores. *Nigritella* puede vivir a más de 2500 metros de altitud en los pastos del Pirineo.

Orchis militaris. Las flores de algunas orquídeas de este género adoptan curiosas formas antropoides. Llama la atención la unión de los pétalos superiores y los sépalos con forma de casco o gálea, a la que alude el nombre específico.



Corallorhiza trifida. Es una de las orquídeas más raras de Europa y, en la península ibérica, se ha identificado tan solo en dos localidades de los Pirineos. Puede permanecer más de un decenio en su forma de vida subterránea.



F. SERRANO (Cypripedium y Neottia); J. V. FERRÁNDEZ (Nigritella); R. MARZAL (Orchis); M. BERNAL (Corallorhiza)



Cypripedium calceolus**,** o zueco de dama, es la orquídea con flores de mayor tamaño de nuestro país. De ella se conocen solo unas pocas poblaciones pirenaicas, que marcan el límite meridional de su distribución europea.

por Juan Pimentel

Juan Pimentel es historiador de la ciencia en el Centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC.



Vanitas zoológica

El megaterio y la primera reconstrucción de un vertebrado extinto

Corrían los primeros meses de 1787, la víspera de la Revolución francesa. La vida, como la entendemos hoy, no existía. Tampoco la historia de la Tierra, ni el tiempo profundo. No lejos de Buenos Aires, en la barranca del Río Luján, una de las arterias fluviales del Río de la Plata, aparecieron semienterrados unos grandes huesos fosilizados. No parecían humanos, eran demasiado grandes, demasiado extraños. Los exhumó un fraile dominico aficionado a la historia natural, Manuel de Torres. Los restos fueron trasladados a la capital del virreinato, donde fueron dibujados por un oficial cartógrafo de origen portugués, José Custodio Sáa y Faria. Estos primeros trabajos de exhumación y recomposición, lejos de aclarar la identidad de los fósiles, añadieron misterio al hallazgo.

¿Quién o qué era aquel extraño cadáver? Se conservan los dos dibujos que le dedicó el oficial portugués. El primero corresponde a un despiece, los huesos aislados como unos *disecta membra*. En el segundo aparecen ya ensamblados, en forma de cuadrúpedo en reposo: las cuatro extremidades rígidas y la columna vertebral paralela al suelo. Ahora bien, ¿qué tipo de cuadrúpedo era? El virrey convocó a unos cuantos caciques locales y les preguntó si conocían o habían tenido noticia de bestias semejantes. El mundo era aún una gran caja de sorpresas. Es cierto que todavía hoy siguen apareciendo especies nuevas, pero en aquellos días, en la víspera del tiempo profundo, antes de la historia de la vida y la evolución, aún había espacio para sorpresas de envergadura como este vertebrado de más de cinco metros de longitud. Sobre todo allí; el Nuevo Mundo era muy reciente.

¿Un rinoceronte? ¿Un tapir gigantesco? ¿Quizás un anfibio? ¿Un animal acuático? Todas estas hipótesis se barajaron ante este «conjunto de huesos inconexos», tal y como los calificó uno de sus descubridores. La primera tarea, pues, consistía en montarlo, conferirle una imagen, esto es, *imaginarlo*. Se contaba con unas cuantas piezas desordenadas, pero faltaba encajarlas, un trabajo muy difícil, puesto que se carecía de una guía que ayudara a componer el rompecabezas. No había modelo. ¿Cómo ensamblar el esqueleto de un animal inédito? ¿Cómo darle forma a un cadáver irreconocible? La paleontología de vertebrados guarda semejanza con la anatomía forense y la investigación criminal. El monstruo del río Luján protagonizó un debate prolongado y fructífero para la historia de la ciencia.

Una columna vertebral cuya longitud superaba los 3,5 metros, un sacro que pesaba más de 150 kilos y un cráneo de casi 70 centímetros. La cabeza no solo resultaba portentosa por su tamaño, sino también por su morfología. Bajo unos maxilares muy marcados se alojaban dos poderosas mandíbulas en las que encajaban unas piezas dentales molariformes. Si le añadimos que las extremidades, muy robustas, estaban rematadas por unas garras falciformes, dotadas de unas vainas o uñas que parecían afiladísimas, el conjunto resultaba desconcertante. La dentadura parecía contradecir las extremidades, no unguladas. ¿Un herbívoro con garras de carnívoro? ¿Un felino del tamaño de un paquidermo?

Los huesos fueron embalados en siete cajones que cruzaron el océano rumbo a

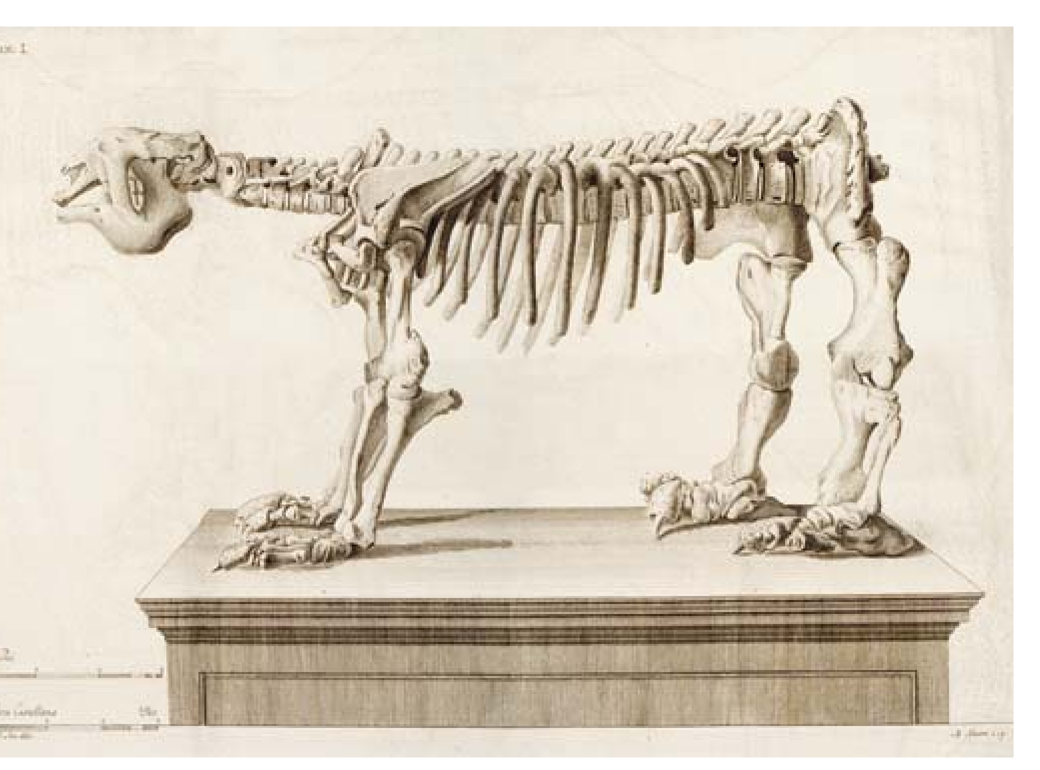


Lámina dibujada y grabada por Juan Bautista Bru y Manuel Navarro, publicada en *Descripción del esqueleto de un cuadrúpedo muy corpulento y raro, que se conserva en el Real Gabinete de Historia Natural de Madrid* (1796), de Joseph Garriga.

La clave residía en la extinción, un concepto problemático entonces

la península Ibérica, adonde llegaron en la primavera de 1788. Su destino, el Real Gabinete de Historia Natural de Madrid. Esta institución, origen del actual Museo de Ciencias Naturales, contaba con poco más de una década de existencia y recibía toda clase de productos naturales de los territorios peninsulares y americanos: petrificaciones, fósiles, meteoritos, conchas, corales, cálculos renales, unos siameses unidos por el pecho, una roca de la que salía un olivo o un «animal de cuerpo como un reloj», entre otros. El Gabinete había nacido para *ilustrar* a la nación en su doble sentido: para instruirla y para representar la riqueza natural de sus extensos dominios. Pero guardaba todavía el aire misceláneo de las cámaras de maravillas, esos espacios del Renacimiento y el Barroco concebidos para albergar las rarezas del mundo, los fenómenos extraordinarios que escapaban a la regla, los que resultaba difícil clasificar o definir, aquellos precisamente que despertaban lo que Aristóteles señaló como el principio del conocimiento: la curiosidad, la capacidad de sorprenderse e interrogarse.

Los monstruos, en este sentido, eran fuente de conocimiento. La ciencia moderna estaba reorientando su interés. De las regularidades y los hechos comunes se pasó a los singulares, los extraños, aquellos que se producían de manera aislada y ocasional: los hechos extraordinarios artificiales (los que se producían en un laboratorio) y los hechos extraordinarios naturales (los monstruos, los prodigios, esos fenómenos que a veces emergían ocasionalmente o en lugares recónditos). Nuestro portento del río Luján encajaba en este apartado y en la cámara de maravillas que Carlos III había levantado en la calle Alcalá, donde hoy permanece la Academia de Bellas Artes, a la que estaba asociado el Gabinete de Historia Natural, «para que compartieran techo la naturaleza y el arte», como reza su frontispicio.

Los huesos fueron desembalados, montados y dibujados por Juan Bautista Bru, disecador y pintor del Real Gabinete. En el montaje abundaban las imprecisiones y los errores de bulto; hasta le añadieron una cola de mula en un primer momento. Algunas piezas fueron serradas, otras rellenadas con madera, corcho y alambres. Bru montó el esqueleto de manera similar a como había sido dibujado en Buenos Aires: como un cuadrúpedo, un caballo o una mula, con sus cuatro extremidades de parecida longitud bien asentadas sobre un pedestal magnífico. Los dibujos de Bru, o quizá de un médico silenciado —esta es una historia detectivesca en todos sus episodios—, fueron copiados por varios sujetos que visitaron el Gabinete en Madrid. Uno de ellos fue un diplomático francés que, fascinado por el montaje, copió los citados dibujos y envió las réplicas al Museo de Historia Natural de París. Allí acababa de ser contratado el joven naturalista que resolvió el jeroglífico a partir de dichas imágenes y a la vista de la gran colección de vertebrados a su alcance en el museo parisino. Se llamaba Georges Cuvier, tenía entonces 26 años e iniciaba con este una larga serie de estudios fundacionales de la anatomía comparada y la paleontología moderna.

¿Qué animal de semejante envergadura podía poseer dentadura de herbívoro y carecer de pezuñas? Vivo, ninguno. La clave residía en la extinción, un concepto problemático entonces. ¿Cómo era posible que hubieran existido animales diferentes a los actuales? ¿No eran fijas las especies? ¿No era perfecta la creación? ¿Había mudado la naturaleza sus formas? Y los seres vivos, ¿se habían transformado? ¿Podían desaparecer algunos? ¿Y surgir otros nuevos? Demasiadas preguntas, demasiado complejas. Era pronto para encajarlas todas, y no digamos para responderlas. El tiempo y la vida constituían misterios que apenas empezaban a emerger. En cuanto a nuestro cadáver, ¿a qué grupo de animales se parecía? Bien mirado, una vez dibujado sobre el papel, desaparecía el tamaño, el obstáculo para apreciar las semejanzas y las analogías (o, por decirlo propiamente, las homologías). Así pudo *imaginarlo* el naturalista francés. Ignorando el tamaño, a la vista de los cráneos y los esqueletos de ciertos animales (el perezoso, el oso hormiguero, el pangolín), Cuvier detectó sus semejanzas con el ejemplar del río Luján y lo ubicó en el grupo de los *edentados*. También lo bautizó: *Megatherium fossile*, esto es, la gran bestia extinta. El megaterio era una especie de perezoso gigantesco desaparecido de la faz de la Tierra, un habitante de un mundo perdido.

Observemos su anatomía. Ofrece un testimonio único de la historia de la ciencia. Todavía se le puede contemplar en esa postura —que hoy sabemos defectuosa— en el Museo de Ciencias Naturales de Madrid. La osteología animal constituye una disciplina relativamente reciente. Las primeras representaciones de osamentas animales son deudoras de la tradición pictórica de esqueletos humanos. A su vez, de Vesalio en adelante, las ilustraciones anatómicas de osteología humana estuvieron marcadas por un tipo de representación muy característico del arte occidental, las *vanitas*, esas pinturas con calaveras que alegorizaban la brevedad de la vida, la futilidad de las posesiones materiales: «polvo eres y en polvo te convertirás». A lo largo de toda la historia y en casi todas las culturas, los huesos, los restos menos perecederos de los seres vivos, siempre tuvieron un alto capital simbólico, una gran densidad semiótica.

Si miramos la imagen del megaterio, nos acercaremos a lo que sintieron sus primeros espectadores a finales del siglo XVIII: un escalofrío ante los restos de un ser colosal y desaparecido, pero también ante la fabulosa brecha del tiempo que se abría camino y ante la historia de la Tierra, cuyas revoluciones y catástrofes comenzaban a aflorar sobre la superficie. Pronto vendrían los mamuts y los dinosaurios. Hubo un tiempo en que vivían sobre la Tierra seres distintos y terribles. Hubo un tiempo en que el hombre no gobernaba la creación, incluso en el que ni siquiera existía. Miramos al megaterio y nos asomamos, más que a un *memento mori* particular, un «recuerda que morirás como individuo» (el tema de las *vanitas*), a un *memento mori* colectivo o plural, relativo a la especie humana en su conjunto. La historia del hombre queda reducida a su verdadero tamaño, apenas una brizna de hierba ante la inmensidad del tiempo: nos hallamos ante una auténtica *vanitas* zoológica.

PARA SABER MÁS

Georges Cuvier: Vocation, science and authority in post-revolutionary France. Dorinda Outram. Palgrave Macmillan, Londres, 1984.

La metamorfosis del megaterio. Fernando Ramírez e Irina Podgorny en *Ciencia Hoy*, vol. 11, n.º 61, págs. 12-19, Buenos Aires, 2001.

Bursting the limits of time: The reconstruction of geohistory in the age of revolution. Martin Rudwick. The Chicago University Press, Chicago, 2005.

El rinoceronte y el megaterio. Juan Pimentel. Abada, Madrid, 2010.

por Stuart Firestein



Stuart Firestein es profesor y catedrático de ciencias biológicas en la Universidad de Columbia. Es autor de *Ignorance: How it drives science*, publicado por Oxford University Press en fecha reciente.

Lo que la ciencia quiere saber

Una ingente montaña de datos puede hacer que se pierda de vista lo esencial

Casi todos los estudiosos están de acuerdo en que Isaac Newton, cuando formuló los principios de la dinámica y la ley de gravitación, en el último tercio del siglo XVII, estaba al corriente de todo cuanto de ciencia había que conocer. Se estima que en los 350 años posteriores se han publicado unos 50 millones de artículos e incontables libros sobre matemáticas y ciencias de la naturaleza. Es probable que un alumno de secundaria disponga hoy de más conocimientos que Newton. Aun así, son muchos quienes ven en la ciencia una montaña inexpugnable de hechos y datos.

La especialización, cada vez mayor, ha sido una de las vías que han tomado los científicos para habérselas con esa montaña. Con limitado éxito. Quien escribe, biólogo, no confía en poder ir más allá de un par de párrafos en un artículo de física. Le desbordan también los de inmunología o biología celular, y otro tanto algunos de su especialidad, la neurobiología. Día tras día parece estrecharse su campo de pericia. En consecuencia, los científicos se han visto en la necesidad de adoptar otra estrategia ante la montaña de información: prescindir de casi toda ella.



Lo cual no debiera sorprender. Es cierto que para dedicarse a la ciencia se requieren amplios conocimientos, pero lo que caracteriza a los científicos no es lo que saben, sino lo que ignoran. Puede parecer una incongruencia, pero para los científicos, los datos, los hechos, son nada más que un punto de partida. En ciencia, cada descubrimiento plantea diez nuevas preguntas, como sardónicamente le hizo notar a Einstein el dramaturgo George Bernard Shaw durante una cena en honor del físico.

Según ese cálculo, la ignorancia aumentará siempre a mayor velocidad que el conocimiento. Científicos y legos estarán de acuerdo en que, por mucho que lleguemos a saber, será mucho más lo que no sepamos. Y lo que es más importante, cada día es más obvio el socrático sabemos que no sabemos. Uno de los más ricos frutos del saber científico es que genera nuevas y mejores formas de ignorancia: no la clase de ignorancia nacida de la falta de curiosidad, o de la incultura, sino, por el contrario, de ignorancia de gran calidad. De aquí que la esencia de las tareas científicas consista en establecer diferencias en las calidades de ignorancia, lo que se lleva a cabo al solicitar subvenciones para la investigación, así como en una distendida charla durante una pausa en un congreso. En palabras de James Clerk Maxwell, que fue tal vez el más grande de los físicos entre Newton y Einstein, «La ignorancia, hondamente sentida [...] es el preludio de todo auténtico progreso en el saber».

Esa forma de entender la ciencia, a saber, que las preguntas importan más que las respuestas, podría ser un alivio. Vista así, la ciencia se torna menos amenazante, más amigable. Y, de hecho, más interesante y amena, pues se convierte en una serie de elegantes enigmas aderezados con rompecabezas, y estos, a su vez, sazonados con nuevas incógnitas. Es como un libro de rompecabezas —y ¿a quién no le gustan los rompecabezas?—. Las preguntas, por otra parte, suelen ser más fáciles de formular que de responder y, a menudo, mucho más interesantes que las respuestas. Estas tienden a constituir el final del proceso, mientras que las preguntas nos mantienen en la espesura de las cosas. Por mi parte, no logro aprehender gran cosa sobre inmunología, a pesar de mi prestigiosa titulación académica, pero lo maravilloso es que otro tanto les ocurre a la mayoría de los inmunólogos: no queda nadie que lo sepa todo. Puedo, no obstante, comprender la naturaleza de los problemas que la guían. Y aunque no pretendo comprender gran cosa de mecánica cuántica, está a mi alcance apreciar cómo surgen los problemas en ese dominio y el porqué de su fundamental carácter. Hacer hincapié en la ignorancia constituye un buen antídoto contra elitismos; nos hace sentir más iguales, lo mismo que la infinitud del espacio nos reduce a nuestras verdaderas dimensiones.

Últimamente, ese aspecto de la ciencia ha venido a quedar muy en segundo plano por lo que llamo imagen acumulativa de la ciencia, que nos es presentada como una inmensa pila de datos, demasiado voluminosa para albergar esperanzas de conquistarla. Pero si los científicos nos explicaran las preguntas, en lugar de aburrirnos hasta sacarnos los ojos de sus órbitas con su jerga, si los medios de comunicación no se limitasen a exponer los descubrimientos y dieran cuenta de los problemas que condujeron a ellos, y si los docentes dejasen de traficar con datos ya disponibles en Wikipedia, tal vez encontraríamos a un público dispuesto a implicarse en esa gran aventura que llevamos viviendo en las quince últimas generaciones.

Así pues, si a usted le presentan a un científico, no le pregunte por lo que sabe, sino por lo que él quiere saber. La conversación les resultará mucho más fructífera a los dos.

OLIVER MUNDAY

por Hervé This

Hervé This pertenece al grupo de gastronomía molecular del instituto AgroParisTech y es director científico de la Fundación Ciencia y Cultura Alimentaria de la Academia de las Ciencias francesa.



Pepinillos en vinagre

Mediante sal, zinc y enzimas obtendremos el encurtido perfecto: poco avinagrado, verde y crujiente

Empieza la temporada. Los pepinillos pronto podrán cosecharse. Para disponer de ellos durante todo el año, lo mejor será encurtirlos. ¿Cómo? La tradición culinaria no nos ayuda mucho, a menos que la interpretemos a la luz de los recientes estudios bioquímicos. En el libro *La cocina moderna,* publicado en 1885, una «reunión de cocineros» revela las características deseadas por los amantes de los pepinillos en vinagre: deben ser poco avinagrados, verdes y crujientes.

Empecemos por lo de poco avinagrados. Tal petición resulta paradójica, puesto que la acidez del vinagre es indispensable: impide la colonización por microorganismos que degradarían los tejidos vegetales. Por tanto, es necesario que el vinagre proteja la superficie de los pepinillos de las intrusiones, pero que no penetre en exceso. Si realizamos un lavado previo con sal, el agua del interior del pepinillo se difundirá hacia la superficie (donde la concentración de sal es mayor). Este fenómeno de ósmosis produce un pepinillo arrugado, que después ya no vuelve a embeber vinagre, sobre todo si está salado y azucarado.

Segundo punto: ¿cómo obtener unos pepinillos muy verdes? La «reunión de cocineros» advierte que han de cocinarse, hasta el primer hervor del vinagre, en un recipiente no estañado. La razón de tal precisión es que, en épocas anteriores, se indicaba que dicho recipiente debía ser de cobre. Los pepinillos deben su color verde, en gran parte, a las moléculas de clorofila, que contienen en su centro un átomo de magnesio unido débilmente a cuatro átomos de nitrógeno. Cuando este átomo es reemplazado por un protón del ácido acético, las clorofilas se convierten en moléculas de feofitina, que modifican el color de los pepinillos hacia el amarillo aceitunado. Al cocer en cobre no estañado, el magnesio es reemplazado parcialmente por el cobre, el cual confiere a los pepinillos un tono verde brillante. Ahora bien, el cardenillo es un temible veneno: ¿acaso esta práctica amenaza la salud?

Ya desde 1860, M.-A. Chevalier y Émile Grimaud responden que sí, y explican una *Manera de saber si ha entrado cardenillo en la preparación de los pepinillos para darles su color verde*: «Esta preparación incorrecta de los pepinillos da lugar a la producción de un poco de cardenillo (sub-acetato de cobre), que puede tener una funesta influencia en la salud de los consumidores. La manera más sencilla de reconocer esta alteración consiste en clavar en el pepinillo una aguja o un alfiler largo, que se recubrirá, al cabo de un tiempo, con una capa de cobre metálico, si el pepinillo contiene una pequeña cantidad de este metal».



A los lectores que pasaron por el laboratorio del instituto o la escuela, esto les recordará un clásico experimento sobre las reacciones redox (de reducción-oxidación), que consiste en sumergir una lámina de hierro en una solución de sulfato de cobre. Y los toxicólogos aciertan al condenar los «recipientes para reverdecer», de cobre no estañado, que los cocineros usaban antaño —¡y a veces incluso en la actualidad!— para conseguir vegetales muy verdes. Pero si se erradica el cobre, ¿cómo se obtendrá el color adecuado? Desde hace varios años, la industria alimentaria estudia añadir zinc, que confiere un bonito tono verde (en 1982 se patentó el proceso *Veri-Green*, basado en este método).

Por fin, el tacto crujiente. Si no se toman precauciones especiales, el pepinillo se ablanda progresivamente. Para evitarlo, los bioquímicos estudian unas enzimas, las pectinmetilesterasas, que actúan sobre las pectinas del cemento intercelular. Como los otros vegetales, los pepinillos están formados por células, envueltas por una membrana que consta de tres polisacáridos: celulosa, hemicelulosas y pectinas; estas últimas forman un cemento intercelular, que es modificado continuamente por las pectinmetilesterasas. Las moléculas de pectina son como largos hilos erizados de grupos carboxílicos (—COOH o —COO^-, según la acidez) algunos de los cuales están metilados (transformados en —$COOCH_3$). Cuando se calientan los tejidos vegetales (al cocinarlos, por ejemplo), se produce el ablandamiento debido a una disociación de las pectinas, que es mayor cuanto mayor sea su grado de metilación.

De aquí se deduce la importancia de las pectinmetilesterasas, que separan parte del metanol de las pectinas y dejan las pectinas con el grupo carboxílico. En este medio ácido las pectinas quedan entonces fuertemente asociadas. Además, Jesús Alonso y sus colaboradores del Instituto del Frío del CSIC demostraron hace unos años que la adecuada activación de dichas enzimas mediante calefacción moderada puede reforzar las membranas gracias al calcio que liberan las células. Después de este tratamiento, los pepinillos podrán esperar, crujientes, a ser consumidos durante el resto del año.

SALUD PÚBLICA

POLIO: ÚLTIMO ACTO

Mientras el número de casos de poliomielitis disminuye, las autoridades sanitarias de todo el mundo han de enfrentarse a un problema inquietante: uno de los componentes de la vacuna antipoliomielítica más utilizada en la actualidad produce más alteraciones que el virus al que supuestamente combate

Helen Branswell

EN SÍNTESIS

La campaña mundial para erradicar la polio comenzó en 1988. Desde entonces, y según el último recuento, los afectados por el virus salvaje en todo el mundo se han reducido a unos 650 en 2011.

Para terminar con la polio por completo se deberá cambiar el programa de vacunación actual, ya que uno de los componentes de la vacuna más utilizada provoca más casos de polio que los que evita.

La Asamblea Mundial de la Salud está desarrollando un plan que podría disminuir el número de casos asociados a la vacuna y acelerar los esfuerzos encaminados a erradicar la enfermedad.

Se plantean varios interrogantes sobre la seguridad de un cambio tan rápido. Si las autoridades sanitarias no llevan a cabo una transición correcta, la polio podría seguir paralizando a niños durante los próximos años.

JOAO HENRIQUES, REDUX PICTURES



GOTEO DE VÍCTIMAS. Aunque la polio ha desaparecido de Occidente, el virus sigue produciendo parálisis a niños de África y Asia todos los años.

Helen Branswell es periodista médica de *The Canadian Press*. Desde 2004 viene informando sobre los trabajos llevados a cabo para erradicar la polio. El viaje y la investigación realizados para escribir este artículo fueron financiados por el Centro Pulitzer para la Información sobre las Crisis y la Fundación Nieman para Periodismo de la Universidad de Harvard.



Las sombras se alargan en la cafetería de una de las residencias del gigantesco campus de la facultad de medicina Christian de Vellore, en la India. Centrado en un tema al que ha dedicado sus últimos años, T. Jacob John no advierte ni la luz ya mortecina ni la nube de mosquitos. Habla de la vacuna oral contra la polio.

John, un hombre delgado que habla y se mueve con una rapidez que contrasta con sus 76 años, es uno de los mayores expertos sobre la polio en la India. Especializado en pediatría, virología y microbiología, ha criticado durante mucho tiempo la continua dependencia de la vacuna antipoliomielítica oral (VPO), utilizada durante casi veinticinco años en la campaña internacional que pretende erradicar del planeta esta enfermedad paralizante y, a veces, mortal. La vacuna es una herramienta magnífica e imperfecta a la vez. Barata y fácil de administrar (cada dosis consiste en unas gotas de una solución oral), ha conseguido que el mundo vislumbre en el horizonte la erradicación de la polio. En efecto, la Organización Mundial de la Salud anunció el pasado mes de enero que no se había producido ningún caso de polio en la India en el último año. Sin embargo, si la distribución de la vacuna no se planifica con cuidado, su uso continuado, al menos tal y como se lleva a cabo hoy en día, podría impedir la erradicación mundial de la enfermedad.

John habla hoy con un periodista acerca de un problema surgido a causa de uno de los componentes de la vacuna oral, que utiliza virus atenuados para estimular la inmunidad contra las tres cepas de polio, los tipos 1, 2 y 3. Otra vacuna, más cara y habitual en los países ricos, consiste en una formulación inyectable fabricada con virus totalmente inactivados o «muertos»; se la conoce como VPI. La cuestión es que el poliovirus de tipo 2 ya no existe en la naturaleza; el último caso producido por la cepa salvaje se registró hace trece años.

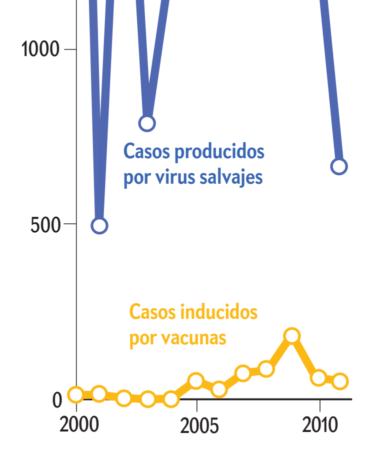
La vacuna actual contra el virus de tipo 2 no despertaría preocupación si la preparación oral resultara inocua. Sin embargo, en algunos casos los virus atenuados pueden volverse de nuevo patógenos y provocar la infección que pretendían evitar. En aquellos lugares donde el poliovirus salvaje aún representa una amenaza, el riesgo de que se produzca una infección natural es muy superior al asociado a la vacuna. Pero si se tiene en cuenta que el único riesgo de parálisis causada por el virus de tipo 2 proviene de la cepa vacunal, el que todavía se utilice esta cepa podría considerarse ineficaz y, aún más, falto de ética. Sin embargo, paradójicamente, mientras la formulación oral contenga el tipo 2, los niños de más de cien países de

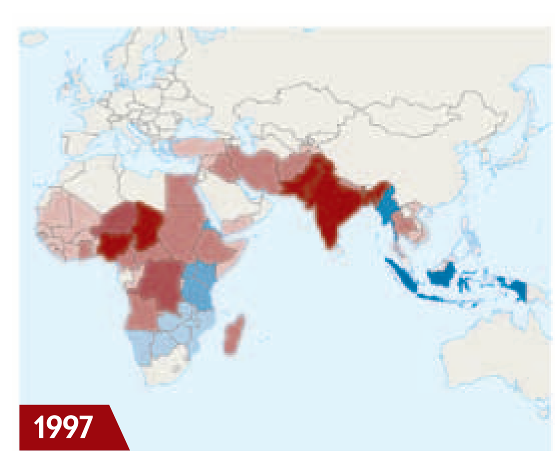
XNR PRODUCTIONS (*mapas*), JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*); FUENTES: ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (*gráfica*); INICIATIVA MUNDIAL PARA LA ERRADICACIÓN DE LA POLIO Y ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (*mapas*)

TENDENCIA A LA BAJA

Progresión de la polio

Hace un tiempo, la polio producía cientos de miles de casos de parálisis en niños. La difusión de la vacuna oral contra la enfermedad redujo drásticamente el número de afectados y el esfuerzo realizado para erradicarla ha logrado que, a comienzos de 2012, la polio sea endémica solo en tres países. Sin embargo, a medida que el número de infecciones naturales disminuye, los casos de polio asociados a la vacuna, aunque muy infrecuentes, resultan inaceptables, por lo que se hace necesario un cambio en la estrategia de vacunación.





todo el mundo deberán ser inmunizados contra la cepa de la vacuna oral.

En 2004, John escribió una carta a la revista médica *The Lancet* en la que urgía a la comunidad internacional a eliminar el virus de tipo 2 de la vacuna oral para convertirla en una vacuna bivalente frente a los poliovirus de tipo 1 y 3. Al igual que otras denuncias que John ha realizado sobre la suspensión oral, su proposición no ha sido escuchada hasta ahora.

La Iniciativa Mundial para la Erradicación de la Polio, en la que colaboran la OMS, UNICEF, la Fundación Rotaria Internacional y los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) de EE.UU., apoya un proyecto para eliminar el componente de tipo 2 de la vacuna oral. La propuesta forma parte de un plan general para suprimir la vacuna oral contra la polio una vez se demuestre que todos los tipos salvajes del virus se han extinguido. En la reunión anual de la Asamblea General de la OMS (planeada para finales de mayo, poco después del cierre del presente número de la revista), estaba previsto pedir que se aprobara la retirada inmediata del virus de tipo 2 de la vacuna oral.

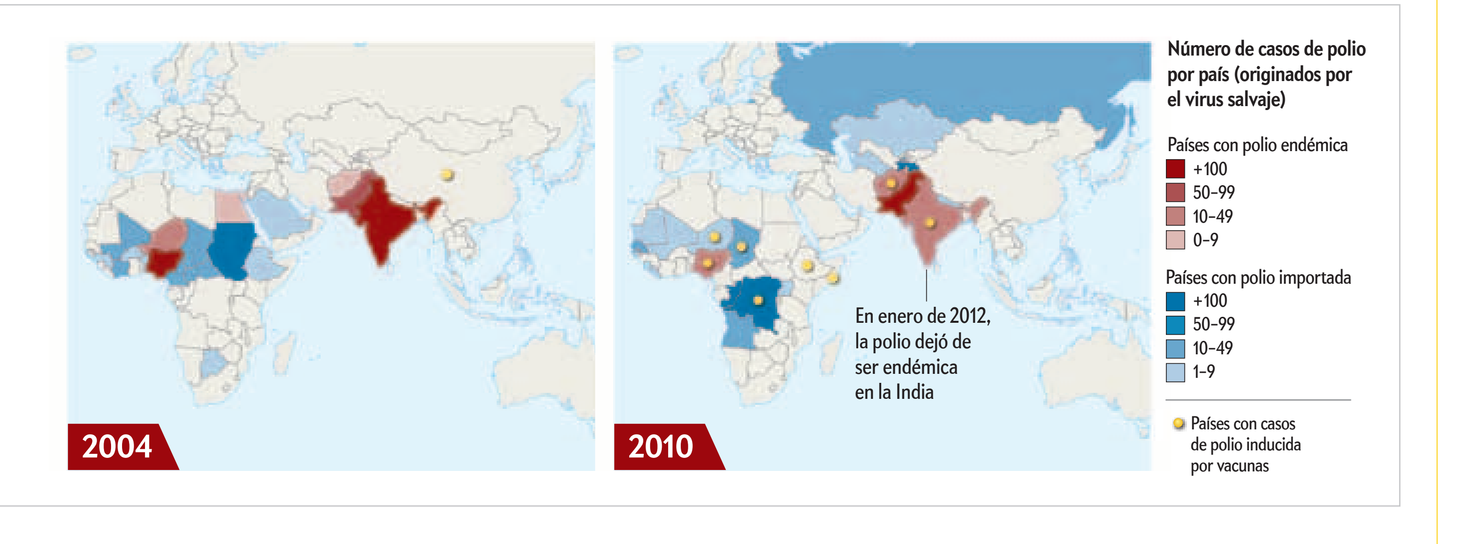
Si se produce ese cambio en la política de actuación, y la asamblea vota a su favor, se daría fin a un problema ético que ha atormentado a quienes durante años se han esforzado por erradicar la polio. También se aceleraría la eliminación de las dos cepas restantes del virus en los tres países donde aún es endémica (Afganistán, Pakistán y Nigeria): un estudio publicado en *Lancet* en 2010 demostraba que la vacuna bivalente resulta al menos un 30 por ciento más eficaz que la trivalente. Sin embargo, el poliovirus posee una especial habilidad para eludir los intentos de contenerlo. El año pasado, China registró sus primeros casos desde hace más de un decenio (los análisis genéticos situaron el origen del brote en Pakistán). Algunos temen que la modificación de la vacuna oral contra la polio tenga consecuencias no deseadas e interrumpa una campaña de erradicación que ya excede en doce años la fecha señalada de su finalización.

CAMBIO DE ESTRATEGIA

Los diferentes países han utilizado las vacunas oral e inyectable para proteger a sus ciudadanos contra la polio desde hace medio siglo. Jonas E. Salk desarrolló la vacuna con virus inactivados, aprobada por Estados Unidos en 1955, mientras que Albert B. Sabin creó la vacuna oral, aprobada en 1962 [*véase* «La vacuna de la Guerra Fría», de William Swanson, *en este mismo número*]. La mayor ventaja de la vacuna oral, además de su bajo coste (unos 15 centavos la dosis, en comparación con los 3 dólares de la vacuna inyectable), reside en su capacidad de producir una infección leve e inocua que provoca la respuesta del sistema inmunitario y confiere así inmunidad al receptor. Con una ventaja añadida: los niños vacunados excretan virus vacunales en sus heces; en los hogares, en los parques, en toda la comunidad, estos virus se propagan de los niños vacunados a los no vacunados, con lo que provocan una respuesta inmunitaria protectora en los últimos. Las autoridades sanitarias sabían, desde principios de los años sesenta, que existía una pequeña posibilidad de que la vacuna oral de virus vivos ocasionara parálisis a algún niño (o incluso a sus contactos próximos, aunque más raramente), pero opinaban que los millones de niños protegidos justificaban ese riesgo. (La idea de que los virus vacunales pueden circular libremente y causar problemas en grandes grupos de niños no vacunados no fue tenida en cuenta hasta mucho más tarde.) Finalmente, la mayoría de los países adoptaron la vacuna oral de Sabin para inmunizar a sus niños, aunque algunas naciones, como EE.UU., cambiaron de nuevo a la forma inyectable de Salk.

Durante años, la estrategia mundial para la erradicación de la polio resultó bastante sencilla. Consistía en la aplicación de la vacuna oral en aquellos países que la preferían o que no podían hacer frente a la vacuna inactivada, más cara, hasta la extinción del virus salvaje. A partir de ese momento, de común acuerdo, todos los países dejarían de usar la vacuna oral a la vez. Los países ricos continuarían utilizando la vacuna con virus inactivados durante un tiempo para conseguir una mayor protección frente a una reemergencia inesperada, pero los países en vías de desarrollo que no pudieran costear esa opción dejarían de vacunar a sus niños. El mundo contendría entonces la respiración a la espera de comprobar si la polio había desaparecido.

Durante la pasada década, numerosos expertos en polio han criticado ese plan, al que han calificado de experimento de alto riesgo, ya que pondría en peligro a millones de niños. Ahora parece que tal enfoque se descartará. «Muchos han abandonado la idea de dejar de vacunar de golpe», dice Roland W. Sutter, científico de la OMS responsable de políticas de investigación



y desarrollo de productos en la Iniciativa Mundial para la Erradicación de la Polio. Un estudio prometedor sobre la eficacia de dosis muy pequeñas del virus inactivado ha alentado la esperanza de que, algún día, una dosis mínima de la vacuna inyectable pudiera incluirse en una vacuna infantil hexavalente que proporcionara protección frente a la difteria, el tétanos, la tos ferina, la hepatitis B, *Hemophilus influenzae* B y la polio. Pero este objetivo se someterá a consideración más adelante.

Por ahora, la atención se centra en terminar con el virus de tipo 2 de la vacuna oral sin complicaciones. Además de las consideraciones éticas que implica mantener la cepa en la formulación, la OMS y otras organizaciones sanitarias se enfrentan a otra dificultad: tal componente pone obstáculos a la eliminación completa de la polio. ¿Cómo acelerar entonces la erradicación? Para R. Bruce Aylward, que ha liderado durante mucho tiempo la iniciativa de la OMS frente a la polio, la respuesta a esa pregunta estriba en hallar una manera de retirar la vacuna oral de tres componentes (trivalente) y sustituirla por una formulación dirigida a los tipos 1 y 3. Él y su equipo esperan obtener beneficios inmediatos, ya que la versión con dos cepas resulta más eficaz que la trivalente. De ahí que la India y Nigeria hayan utilizado la vacuna bivalente en algunas campañas de inmunización de los dos últimos años. (Los niños que viven en zonas de alto riesgo a menudo son vacunados numerosas veces para reforzar la inmunización.)

UNA TRANSICIÓN DIFÍCIL

Las autoridades sanitarias de todo el mundo sienten cada vez más la necesidad de modificar la vacuna trivalente, ya que los casos de parálisis atribuidos al componente de tipo 2 se hacen más difíciles de justificar a medida que descienden los casos de infección natural. Los años de experiencia con la vacuna oral han demostrado que entre dos y cuatro de cada millón de niños nacidos el mismo año contraerán la polio a causa de la vacuna oral, con cerca del 40 por ciento de los casos debidos a la cepa de tipo 2. (El riesgo que tiene un niño de contraer la polio a partir de la vacuna disminuye con cada dosis adicional que reciba.) Con todo ello, la OMS calcula que unos 120 niños contraerán la enfermedad cada año como consecuencia de la inoculación, aunque John cree que la cifra será varias veces mayor.

Además, aunque infrecuentes, hay que tener en cuenta los efectos nocivos indirectos de la vacuna. Entre los años 2000 y 2010, la propagación secundaria del virus vacunal de los niños inoculados a los no inoculados produjo al menos 538 casos de polio. El virus de tipo 2 fue responsable del 84 por ciento de esos casos.

Cuando la vacuna causa la polio, la enfermedad se denomina poliomielitis paralítica asociada a la vacuna, o PPAV; cuando una persona no vacunada contrae la enfermedad a partir del virus vacunal, transmitido de persona a persona, el virus se denomina poliovirus derivado de la vacuna, o PVDV.

El mayor brote de PVDV comenzó en 2005 y aún perdura en Nigeria, en donde la difusión del virus vacunal de tipo 2 ha producido parálisis al menos a 376 niños no vacunados. Los virus de esa epidemia se han extendido también a los países vecinos Níger y Guinea. Según Aylward, habrá que detener el brote nigeriano antes de que el mundo pueda eliminar de forma segura el componente de tipo 2 de la vacuna oral. En un giro inesperado del destino, la formulación que incluye la cepa de tipo 2 se ha de mantener a pesar de los riesgos que conlleva, ya que por ahora representa el modo más factible de conferir inmunidad frente a esa cepa.

El coste de la vacuna inyectable necesaria para preparar el paso a la vacuna bivalente podría reducirse a 35 o 40 centavos la dosis con compras al por mayor, fabricación local (en lugares como la India y China) y dosis fraccionadas, apunta Aylward desde la OMS. Los estudios económicos indican que si el precio por inyección pudiera reducirse a 50 centavos la dosis, la utilización de la vacuna inactivada resultaría factible incluso en los países más pobres. La conclusión es que una versión muy barata de la vacuna inyectable (al menos, en com-

ESTRATEGIAS DE VACUNACIÓN

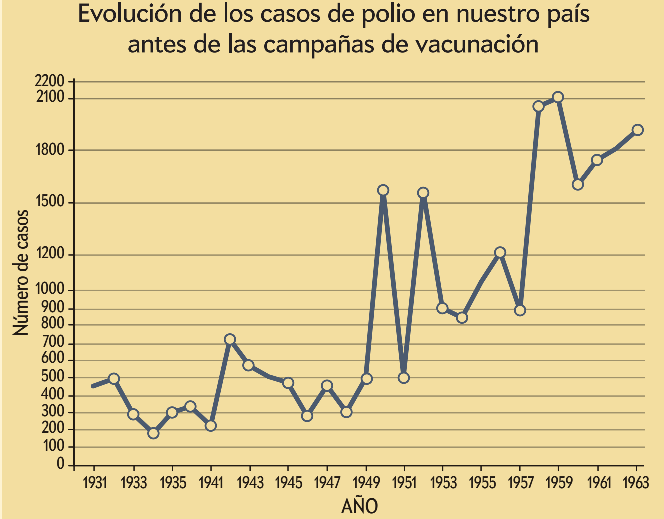
Herramientas para la jugada final

Las autoridades de salud pública han utilizado dos tipos principales de vacunas para proteger a los niños frente a la polio, una fabricada con virus vivos atenuados y otra con virus inactivados. Los riesgos y beneficios de ambos tipos se detallan a continuación. La eliminación de la enfermedad conllevará una difícil transición, de la vacuna de virus vivos con tres componentes, muy extendida, a una nueva versión con dos componentes y, por último, la retirada total de la vacuna.

	Descripción	A favor	En contra
Vacuna trivalente de virus vivos	Contiene versiones atenuadas de las tres cepas del poliovirus (tipos 1, 2 y 3)	• Administración oral, por lo que solo se necesita una formación mínima para dispensar la vacuna • Es barata • Los niños no vacunados se pueden beneficiar de ella	• En casos excepcionales, los virus atenuados de la vacuna pueden producir polio paralítica; el virus natural de tipo 2 ya no circula, por lo que todos los casos de polio de tipo 2 proceden ahora de la propia vacuna
Vacuna bivalente de virus vivos	Contiene solamente los tipos 1 y 3 del poliovirus	• Todos los beneficios de la vacuna trivalente, pero no causa la polio de tipo 2	• Su aplicación no es segura si el poliovirus vacunal de tipo 2 sigue propagándose de forma inadvertida
Vacuna de virus inactivados	Contiene versiones químicamente inactivadas de las tres cepas del poliovirus	• No produce la polio	• Es cara • Es inyectable, por lo que debe ser administrada por personal sanitario (escaso en los países pobres)

Los esfuerzos para combatir la enfermedad en España

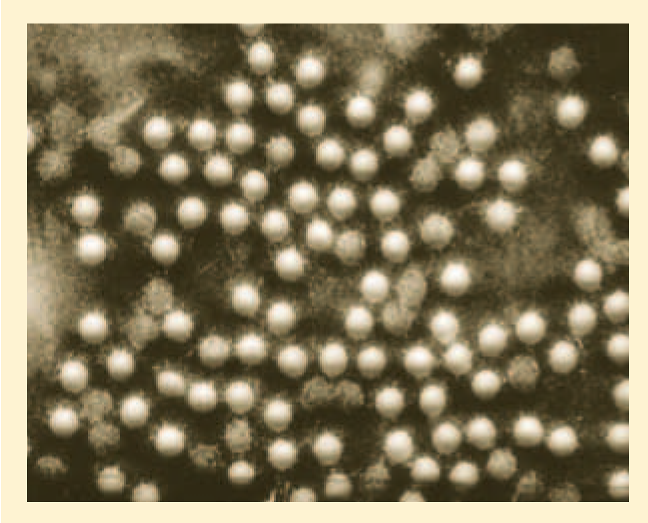
La poliomielitis apareció como enfermedad epidémica en todo el mundo a finales del siglo XIX. En ese tiempo empezó a manifestarse en España en forma de brotes esporádicos. En 1929 tuvo lugar en Madrid la primera epidemia de polio y tras la Guerra Civil se convirtió en un importante problema de salud pública, alcanzándose en 1959 y 1960 las tasas más altas de morbilidad y mortalidad. Hasta entonces, la lucha contra la enfermedad había resultado escasa y poco eficaz. Hubo que esperar a la creación del Servicio Nacional de Poliomielitis, en 1958, albergado en el Hospital del Rey de Madrid. Allí se atendía a los enfermos en la fase aguda y en la fase crónica de la infección. El tratamiento incluía fisioterapia, ortopedia y, en el caso de secuelas, cirugía ortopédica para corregirlas. El servicio se mantuvo en activo hasta mediados del decenio de los ochenta.



Las campañas de vacunación

En el mismo año 1958, la Dirección General de Sanidad comenzó una campaña de vacunación antipoliomielítica, experimental y voluntaria, con la vacuna de virus inactivados desarrollada por Jonas E. Salk. Hubo que importar el medicamento, ya que ningún laboratorio en España estaba preparado para fabricarlo.

En 1963 se planteó la campaña nacional de vacunación antipoliomielítica con la vacuna oral de virus atenuados de Albert B. Sabin. A modo de fase preparatoria, se desarrolló una campaña piloto en León y Lugo entre mayo y junio, en la que se analizaron muestras de suero en un grupo representativo de personas para examinar la elevación de tasas de anticuerpos una vez recibida la vacuna. El estudio, realizado por el Centro Nacional de Virus de la Dirección General de Sanidad, permitió comprobar la eficacia de la vacuna administrada en la campaña piloto y afrontar la campaña nacional. Esta se llevó a cabo en dos fases: la primera, en diciembre de 1963 y enero de 1964; la segunda, entre abril y mayo de 1964. Todos los niños de entre 2 meses y 7 años de edad recibieron las dos dosis de vacuna; se alcanzaron coberturas de vacunación de entre el 95 y el 98 por ciento, que repercutieron en una brusca caída de la incidencia de la enfermedad y de la mortalidad asociada a ella.



Micrografía electrónica del poliovirus.

Situación actual

En España no se han producido casos de polio desde 1989. Un estudio seroepidemiológico realizado en 1996, basado en una muestra de población de entre 2 y 40 años de edad, para investigar la prevalencia de anticuerpos frente a los tres poliovirus incluidos en la vacuna, reveló que más del 95 por ciento de la población española nacida a partir de 1956 los presentaba. Las coberturas de vacunación con tres dosis de vacuna antipoliomielítica han sido superiores al 90 por ciento en todas las Comunidades Autónomas desde 1996. En 2004 se sustituyó en el calendario vacunal infantil la preparación oral por la inyectable, por lo que ya no se producen los casos de parálisis, muy raros, originados por los virus atenuados de la vacuna oral. La formulación de virus inactivados forma parte de las vacunas combinadas que incluyen la antipoliomielítica junto a la del tétanos, difteria y tos ferina (vacuna tetravalente) y, a veces también, junto a la de la hepatitis B (pentavalente) y la de *Hemophilus influenzae* (hexavalente). En la actualidad, la pauta habitual para la vacunación sistemática contra la polio comprende una dosis a los 2, 4 y 6 meses de vida, una de refuerzo a los 18 meses, y una de recuerdo entre los 4 y 6 años.

La poliomielitis sigue visible entre nosotros a través de las personas que sobrevivieron a la enfermedad pero quedaron con secuelas físicas, y de aquellas otras que presentan el síndrome post-poliomielitis (cuadro de fatiga progresiva, debilidad muscular y dolor articular); suele aparecer en personas que sufrieron un ataque agudo de polio entre 15 y 30 años atrás. El síndrome comenzó a describirse a partir del decenio de los setenta; según diversas estadísticas, lo presentan entre el 20 y el 80 por ciento de quienes padecieron el ataque.

En 2002 la OMS certificó la Región de Europa (51 países) como zona libre de polio, después de tres años sin ningún caso ocasionado por poliovirus salvajes. No obstante, en 2010 se produjo en la zona un nuevo caso de polio importado.

María José Báguena Cervellera
Depto. Historia de la Ciencia y Documentación, Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero, Universidad de Valencia

paración con su formulación habitual), supone un cambio repentino de las reglas del juego. Según Aylward, al eliminar el problema del coste, se prioriza el debate científico y programático sobre el modo más seguro de enfrentarse hoy al riesgo de la polio.

LA EXPERIENCIA COMO BASE

El paso de una vacuna a otra representa un proceso complejo, incluso en países con grandes recursos, como EE.UU. Cuando en este país comenzó a considerarse, a principios y mediados de los noventa, la posibilidad de volver a la vacuna inactivada de Salk, muchos se opusieron con firmeza. Temían que la medida resultara contraproducente.

Confiar solo en la vacuna inactivada significaría que las personas no vacunadas, quienes previamente obtenían protección mediante la diseminación del virus vacunal, nunca más lograrían la inmunidad pasiva. Resultarían vulnerables a la infección procedente de cualquier viajero portador del poliovirus o al virus vacunal de personas inmunizadas con virus vivos. En EE.UU., donde el programa de vacunación había demostrado tanto éxito, llevó mucho tiempo convencer a la gente de que había que cambiar a la vacuna inactivada de la polio, comenta Samuel L. Katz, profesor emérito de pediatría de la facultad de medicina de la Universidad Duke. Katz colaboró en el desarrollo de la vacuna contra el sarampión y ha sido, hasta hace un año, presidente del Comité de Investigación sobre la Polio de la OMS.

Walter Orenstein, especialista en poliomielitis que trabaja en la Universidad de Emory y anteriormente lo hizo en los CDC y en la Fundación Bill y Melinda Gates, era un ferviente defensor de la vacuna oral. Estaba convencido de que EE.UU. se había librado de la enfermedad solo gracias a la diseminación secundaria de la vacuna de Sabin. Orenstein temía que si se adoptaba únicamente la vacuna inactivada, se mantendría el riesgo de nuevos brotes de la enfermedad. Sabía que la vacuna producía parálisis cada año a unos cuantos niños, pero pensaba que si se cambiaba a la vacuna inactivada, se abriría una brecha inmunitaria a través de la cual podrían introducirse los poliovirus y muchos más niños se verían perjudicados.

En una de las numerosas reuniones organizadas para debatir si se debería volver a la vacuna inactivada, Orenstein tuvo un encuentro que le hizo cambiar de opinión. Fue en 1996. Hacía diecisiete años que se había producido el último caso de polio a causa del virus salvaje en EE.UU. Algunos afectados por el virus vacunal habían acudido a la reunión con el propósito de presionar para que se realizara el cambio. «Cuando miré a esas personas y me di cuenta de que si hubieran recibido la vacuna de virus inactivados nunca se habrían quedado paralíticos y estarían protegidos frente a la enfermedad, me resultó muy difícil mantener mi idea», admite Orenstein. «Fue un momento definitivo. Me convertí en un defensor de la vacuna de virus inactivados». En 1997 comenzó en EE.UU. una retirada progresiva de la vacuna oral (se inmunizó a los niños con las dos vacunas a la vez hasta 1999 para garantizar un nivel adecuado de protección en la población).

Orenstein recuerda con nitidez la incertidumbre de aquellos tiempos: «¿Y si nos habíamos equivocado? ¿Y si los temores eran fundados y se producía un gran brote epidémico de polio en EE.UU.? La gente nos reprocharía el cambio. Suponía una decisión muy difícil, porque había numerosos aspectos que se desconocían».

LA FASE FINAL

Los resultados demostraron muy pronto que se había adoptado la decisión correcta. Meses después de realizarse el cambio a la vacuna inactivada, los casos de polio asociados a la vacuna desaparecieron en EE.UU. En la actualidad, 56 países utilizan solo la vacuna inactivada (algunos, como Suecia, han optado siempre por ella). Dieciséis países aplican ambas modalidades, y 121, solo la oral.

Sutter, miembro de la Iniciativa Mundial para la Erradicación de la Polio, ha afirmado que la sustitución de la vacuna trivalente por la bivalente tendrá lugar entre abril de 2013 y abril de 2014. Pero antes han de solucionarse algunos aspectos. Entre otros, que los países que fabrican su propia vacuna oral, como México, China y Brasil, se movilicen pronto para autorizar una vacuna oral bivalente. Si obligan a los fabricantes a realizar ensayos adicionales para asegurar la seguridad y eficacia de la nueva vacuna, en vez de confiar en los llevados a cabo por la OMS, ya finalizados, el cambio se retrasará.

Quedan por contestar importantes cuestiones. ¿Conviene aplicar las dosis fraccionadas de vacuna inactivada en todo el mundo, solo en los países de alto riesgo, o quizás en estos y en los países vecinos? Al contrario que la vacuna oral, la inyectable debe administrarla un profesional sanitario. Pero muchos de los países en los que la polio supone una amenaza cuentan con escaso personal preparado, de ahí la necesidad de manejar bien los recursos. Orenstein, que participa en los debates, señala que aún se está trabajando en los detalles del proyecto. Por ahora, tan solo se les pide a los países miembros de la OMS que aprueben la retirada gradual de los componentes víricos de la vacuna oral, comenzando por el poliovirus de tipo 2 de Sabin, especialmente problemático, según describen los documentos de la organización.

¿Y John? ¿Se alegrará del desarrollo de una vacuna oral bivalente, partidario de ese cambio hace ocho años? Por irónico que parezca, ahora es una de las personas que muestra inquietud por el proyecto. Al comprobar la rapidez con que el poliovirus derivado de la vacuna se propaga de persona a persona, piensa ahora que dejar a los niños sin protección frente a la cepa de tipo 2 en los próximos años constituye un riesgo, ya que es posible que algunos de los virus vacunales persistan en el entorno sin ser detectados. John afirma que se sentiría mejor si el cambio se realizara una vez se garantizara que la campaña preparatoria con vacunas inactivadas ha producido una inmunidad elevada y generalizada frente a la cepa de tipo 2. De lo contrario, teme que incluso los lentos avances conseguidos en el último quinquenio se desvanezcan y la polio siga paralizando a los niños en los próximos años.

PARA SABER MÁS

Vaccine policy changes and epidemiology of poliomyelitis in the United States. Lorraine Niño Alexander et al. en *Journal of the American Medical Association*, vol. 292, n.º 14, págs. 1696-1701, 13 de octubre de 2004.

Polio: An American story. David M. Oshinsky. Oxford University Press, 2005.

The polio endgame. Bruce Aylward y Tadataka Yamada en *New England Journal of Medicine*, vol. 364, n.º 24, págs. 2273-2275, 16 de junio de 2011. **www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMp1104329**

Centros para el Control y Prevención de las Enfermedades, página sobre la polio: Preguntas y respuestas: **www.cdc.gov/vaccines/vpd-vac/polio/dis-faqs.htm**

Iniciativa Mundial para la Erradicación de la Polio: **www.polioeradication.org**

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

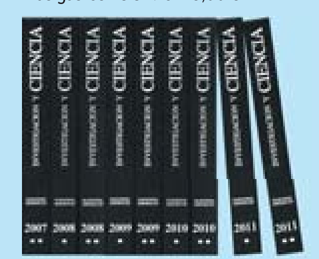
Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA**
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE Y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-67: Cien años de Alan Turing

MENTE Y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

HISTORIA DE LA CIENCIA

LA VACUNA DE LA GUERRA FRÍA



Mientras las superpotencias amenazaban con destruirse mutuamente con armas nucleares, Albert B. Sabin recurrió a un aliado insólito, un científico soviético con el fin de ensayar su nueva vacuna oral contra la polio

William Swanson

Para muchos estadounidenses, la Guerra Fría es historia antigua. Hace tan solo unas décadas que el mundo se hallaba peligrosamente dividido en dos bloques, los países del Este y los de Occidente, y la política mundial venía definida por el antagonismo entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Sucesos como la «acción policial» en Corea, que mató a millones de personas a comienzos de los años cincuenta del siglo pasado, y la crisis cubana de los misiles, diez años después, llevó a ambos Gobiernos y a sus aliados al borde de la guerra nuclear.

Al mismo tiempo, los estadounidenses experimentaban pánico ante un enemigo mucho más cercano a su hogar. Se trataba de la polio, abreviatura de poliomielitis, también conocida como parálisis infantil debido a su prevalencia en niños y adultos jóvenes. El agente causal, un virus que se difundía a través del contacto con materia fecal, se conocía desde los años treinta del pasado siglo, pero no se sabía cómo controlarlo. Durante los brotes epidémicos esporádicos, las autoridades cerraban las piscinas, los cines y otros lugares habituales de reunión con la esperanza de detener la enfermedad, que atacaba al sistema nervioso central y, a menudo, paralizaba e incluso mataba a sus víctimas. Los informativos en que aparecían niños con extremidades deformes y adolescentes inmóviles, metidos en pulmones de acero semejantes a ataúdes, aterrorizaron a la población como pocas otras imágenes de la época lo hicieron.

Por aquel entonces, durante el crudo invierno de la Guerra Fría, dos científicos extraordinarios, uno estadounidense y otro ruso, formaron una poderosa alianza. De haberla conocido, su empresa conjunta habría indignado a fanáticos de ambos lados del telón de acero. Su colaboración, puesta de manifiesto en materiales de archivo dados a conocer hace poco por la Universidad de Cincinnati y algunas fuentes contemporáneas, dio lugar a uno de los más grandes descubrimientos del siglo xx y salvó incontables vidas en todo el mundo.

LA BÚSQUEDA DE UNA VACUNA EFICAZ

A comienzos del decenio de los cincuenta se buscaba intensamente una vacuna contra la polio en EE.UU. Los virólogos Jonas E. Salk, de la Universidad de Pittsburgh, y Albert B. Sabin, de la Universidad de Cincinnati, destacaban entre las docenas de investigadores financiados por la Fundación Nacional para la Parálisis Infantil (ahora, Fundación March of Dimes). En 1955,

AP PHOTO



William Swanson es periodista especializado en salud, historia y política.

ALIADOS: aunque sus países se hallaban enfrentados, Albert B. Sabin (*página anterior*) y Mikhail P. Chumakov demostraron que una vacuna oral podía proteger de la polio a millones de personas.



tras ensayarla en casi dos millones de escolares de todo el país, la vacuna de Salk fue la primera en ser aprobada por el Gobierno estadounidense. Mientras Salk se convertía, en palabras del historiador David S. Oshinsky, en «un héroe instantáneo, una celebridad científica», Sabin continuaba trabajando en lo que él consideraba una vacuna mejor.

Ambas estrategias ofrecerían protección frente a la infección, aunque de forma diferente. La vacuna de Salk se componía de poliovirus inactivados (muertos, según la terminología popular) mediante formol. Sabin, en cambio, pensaba que una vacuna fabricada mediante poliovirus atenuados, pero todavía vivos, resultaría más eficaz que la de virus inactivados, ya que produciría una inmunidad de por vida.

Las vacunas con virus vivos ofrecían también la posibilidad de producir una inmunización secundaria, ya que los niños vacunados infectarían de forma pasiva a las personas no vacunadas próximas a ellos, que de este modo quedarían protegidas. Además, mientras que la preparación de Salk debía inyectarse, la de Sabin podía administrarse por vía oral por medio de un pequeño terrón de azúcar o una cuchara. Ello permitía vacunar de forma rápida y barata a decenas de miles, incluso a millones de personas, sin necesidad del molesto pinchazo de la inyección. Por esas razones, Sabin creía que su vacuna no solo constituía la mejor manera de controlar la enfermedad, sino de erradicarla de la faz de la tierra.

Los principales medios de comunicación contribuyeron en buena parte a la competitividad entre Sabin y Salk, aunque otros importantes científicos participaban también en la pugna por hacerse con el mercado estadounidense. Había algo de verdad por debajo de las exageraciones de la prensa. Salk y Sabin, a pesar de compartir la misma ascendencia ruso-judía, fuente de financiación y enemigo vírico, se hallaban muy enfrentados. Sabin se burlaba de la «química de cocina» de Salk e insistía en que este no había descubierto nada. Salk creyó que Sabin, celoso de su temprano éxito, deseaba desafiarle desde el principio. Sin duda, Sabin se resentiría del reconocimiento del que disfrutaba Salk tras la aprobación de la vacuna con virus inactivados, mientras que Salk se enfurecería cuando un contemporáneo suyo le calificó de publicista pretencioso, y a Sabin de científico verdadero.

En 1955, Sabin había identificado las tres cepas del poliovirus que pensaba debían incluirse en la vacuna para que resultara eficaz (Salk había utilizado cepas distintas), pero aún carecía de las pruebas que lo demostraran. A principios del decenio de los cincuenta, Sabin había ensayado su vacuna en cientos de voluntarios, entre ellos, adultos jóvenes encarcelados en la prisión federal de Chillicothe, en Ohio, así como en sí mismo, su mujer y sus dos hijas, y en vecinos y amigos. Pero sabía que esas pruebas resultaban insuficientes, incluso aunque contara con cientos o miles de participantes más. Necesitaba millones de personas para demostrar la eficacia y seguridad de su vacuna. Debido a que la preparación de Salk ya se había utilizado de forma generalizada en todo el país, no quedaban suficientes personas sin vacunar en EE.UU. que le sirvieran para su estudio.

Mientras tanto, en la Unión Soviética la incidencia de la polio aumentaba con rapidez. Durante los años de la dictadura de Iósif Stalin, las autoridades negaron que la enfermedad representara un problema. Sin embargo, la aparición de brotes epidémicos en Moscú, Minsk y poblaciones remotas de Siberia lo desmintieron y los científicos soviéticos, igual que sus homólogos estadounidenses, empezaron a buscar una solución. Los in-

vestigadores de ambos países habían unido en algunas ocasiones sus esfuerzos en el cuarto de siglo comprendido entre la Revolución Bolchevique de 1917 y el final de la II Guerra Mundial. No obstante, toda cooperación se desvaneció cuando el Este y Occidente se enfrentaron a raíz de la victoria aliada en 1945. Tras la muerte de Stalin, en 1953, sus sucesores, no tan rígidos y más alarmados por el incremento de las cifras de polio, permitieron que los investigadores buscaran ayuda más allá de sus fronteras.

Los dos virólogos rusos de mayor reputación en ese momento eran Anatoli Smorodinstev y Mikhail P. Chumakov. En enero de 1956, Smorodinstev, Chumakov y la mujer de este último, Marina Voroshilova (también una reconocida investigadora), viajaron a EE.UU. para entrevistarse con varios científicos estadounidenses, entre los que se encontraban Salk y Sabin. Aunque aprobada discretamente por ambos Gobiernos, la visita se vio ensombrecida por las pesadillas de la Guerra Fría: los rusos fueron obligados a cruzar el país en tren en vez de hacerlo en avión, la opción más cómoda, mientras que los estadounidenses estaban convencidos de que al menos uno de los «doctores» que acompañaban a los visitantes era un miembro de la KGB. A pesar de todo, ambas partes calificaron la visita de exitosa. Se intercambió una valiosa información científica y, lo que es más importante, como más tarde se supo, Chumakov y Sabin congeniaron y establecieron los lazos que darían lugar a una relación muy productiva.



PULMONES DE ACERO: En el decenio de los cincuenta del siglo XX, miles de niños permanecían en respiradores mecánicos como estos debido a que sus músculos respiratorios mostraban parálisis. Los cambios de presión en el interior del habitáculo forzaban al tórax a expandirse y contraerse, lo que permitía respirar a los pacientes.

CORBIS

EL DOCTOR SABIN VIAJA A RUSIA

En junio de 1956, Sabin, autorizado por un cauteloso Departamento de Estado de EE.UU. e investigado por el siempre vigilante FBI, voló a Rusia. Durante las semanas siguientes se reunió con Chumakov, Voroshilova, Smorodinstev y otros investigadores clave.

Aunque Salk también había sido invitado, Sabin participó solo en la misión. Años más tarde, Peter, el hijo de Salk, contó a Oshinsky que su padre había rechazado la invitación rusa porque su mujer, cansada de las frecuentes ausencias del marido, «se había plantado». El relato de Oshinsky sugiere otra posibilidad. Cuando era joven, Salk había sido uno de los miles de estadounidenses que defendió públicamente posturas de izquierdas, por lo que había llamado la atención del FBI. Quizá Salk temiera que una visita a la Unión Soviética se interpretaría mal. O más probablemente aún, siendo un científico de renombre, rico y famoso gracias a su innovadora vacuna, pensaría que el viaje le aportaría poco. Al contrario que Sabin, no tenía nada que demostrar.

Sabin, por su parte, regresó a sus orígenes. Había nacido en 1906 en Bialystok, una ciudad polaca que formó parte del imperio ruso y, posteriormente, de la Unión Soviética. Provenía de una familia pobre. El padre, tejedor, fue el sostén de la familia; la madre, como él recordó más tarde, llevaba la iniciativa. Después de que la familia Sabin emigrara a EE.UU. en 1921, Albert aprendió con rapidez el idioma y las costumbres del país. Tras graduarse en medicina por la Universidad de Nueva York en 1931, se hizo un nombre como investigador en Nueva York, Londres y Cincinnati, al estudiar la polio, la encefalitis y otras enfermedades neurológicas. Fue uno de los que pusieron en entredicho la idea que se tenía sobre la forma en la que el virus de la polio se introducía en el organismo. Según él, la vía de entrada no eran las fosas nasales, tal y como Simon Flexner, el padre de la investigación sobre la polio, había afirmado, sino el tracto alimentario; el virus, tras penetrar por la garganta, viajaba hasta el tubo digestivo, pasaba al torrente sanguíneo y, desde allí, al sistema nervioso central. Estos nuevos conocimientos resultaron cruciales para dar el siguiente paso: desarrollar una vacuna que activara la respuesta del sistema inmunitario contra el virus.

En la Unión Soviética, Sabin se enfrentó a nuevos desafíos, como integrarse en un grupo de investigadores y defender su vacuna ante ellos. Se encontró con el escollo del idioma, ya que nunca dominó el ruso, ni tampoco sus colegas soviéticos hablaban inglés con fluidez. Contaban con intérpretes, pero la colaboración habría resultado más sencilla si los investigadores se hubieran comunicado en el mismo idioma. Cabe preguntarse si Sabin aún conservaba los miedos y prejuicios de su infancia en Bialystok, donde los judíos vivían con el temor constante de ser atacados y donde, como recordó una vez, creció «pensando en los soldados rusos como asesinos». Si Sabin albergó tales pensamientos durante su visita a la Unión Soviética, aparentemente los guardó para sí. Más tarde insistió en que fue acosado por agentes soviéticos y estadounidenses, que siguieron todos sus movimientos y grabaron sus intervenciones públicas.

EN SÍNTESIS

Cuando la Guerra Fría se hallaba en su apogeo, la polio paralítica constituía una de las pocas cuestiones que despertaban mayor temor entre estadounidenses y rusos que sus respectivos enemigos.

Documentos hechos públicos recientemente detallan la insólita colaboración entre Albert B. Sabin, de Estados Unidos, y Mikhail P. Chumakov, de la Unión Soviética, en la lucha contra la infección.

Sabin y Chumakov comprobaron juntos que una vacuna contra la polio fabricada con cepas atenuadas del virus resultaba segura y eficaz. **La campaña mundial** llevada a cabo contra la polio mediante vacunas de virus vivos ha disminuido el número de casos de polio en todo el mundo, desde 350.000 en 1998 hasta 650 en 2011.

A pesar de todas las complicaciones, Sabin estableció en los años siguientes unas valiosas relaciones de trabajo, que en algunos casos fueron también personales, con sus anfitriones rusos. Ninguna fue tan beneficiosa como la amistad mantenida con Chumakov.

«EL GENERAL» Y EL TELÉFONO ROJO

Chumarov resultó ser el compañero perfecto para Sabin. Había nacido en 1909 en el Cáucaso, en el seno de una familia humilde. Su padre era veterinario militar; su madre, una campesina que no aprendió a leer y escribir hasta los 70 años. Konstantin, el hijo de Chumakov, contó que cuando su padre tenía 16 años se trasladó a Moscú para ingresar en la universidad. Fue admitido en la facultad de derecho y en la de medicina; eligió entrar en esta última.

Ni Chumakov ni Sabin soportaban a los necios y ambos estaban convencidos de que estos se hallaban por doquier. La brillantez de Sabin como científico tan solo rivalizaba con su temible reputación como jefe y competidor. Muy exigente consigo mismo, pedía al equipo una atención enfermiza a cada detalle. Seguro de sus opiniones, arremetió en público contra las conclusiones de sus adversarios. Philip Russell, prestigioso virólogo y uno de los fundadores del Instituto de Vacunación Sabin con sede en Washington D.C., conoció a Sabin y a muchos de los que trabajaron en su laboratorio. Haciéndose eco de la opinión generalizada sobre él como hombre y como investigador, Russell afirmó: «Sabin era impulsivo y meticuloso, un científico visionario. También era duro, arrogante y creía no equivocarse nunca». Los conocidos de Sabin se habrían sorprendido de haber sabido que Chumakov poseía un carácter aún más volcánico. En 1958, en una carta dirigida a Sabin, Chumakov se quejaba de «las intrigas de los cobardes y pseudoespecialistas» a quienes no vacilaba en citar por su nombre.

«Fue una suerte que se conocieran», comenta Konstantin, quien vive en EE.UU. desde 1989 y es en la actualidad director adjunto de la Oficina de Investigación y Revisión de Vacunas de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos. «Sabin tenía la vacuna que podía salvar de la muerte o la parálisis a innumerables personas, y mi padre halló el modo de superar los obstáculos burocráticos para llevarla adelante. Sabin llamaba a mi padre "el General", porque conseguía que las cosas se hicieran».

Los virólogos rusos habían experimentado con la vacuna de virus inactivados de Salk, pero Chumakov buscaba una forma más sencilla, barata y eficaz de ofrecer protección contra la polio a la inmensa población de la Unión Soviética. En 1959, Chumakov decidió organizar los primeros ensayos clínicos a gran escala con la vacuna oral de cepas atenuadas que Sabin había desarrollado en EE.UU. Se trataba de una empresa monumental y repleta de problemas, el primero de ellos, lograr la aprobación de las autoridades.

«Sabin dio credibilidad a mi padre y al sistema soviético, cuya organización hizo posible los ensayos a gran escala», añade Konstantin. «Sin embargo, dudo que mi padre contara alguna vez a Sabin la verdadera historia que había detrás. Según me explicó más tarde, mi padre jamás obtuvo permiso para llevar a cabo un gran ensayo clínico. Numerosas personas del Ministerio de Sanidad se oponían a ello. Le argumentaban que ya disponían de la vacuna de Salk, que daba buenos resultados, por lo que no había motivos para ensayar el virus vivo». Entonces mi padre decidió dar un rodeo y esquivarlos.

«En la Unión Soviética, la autoridad suprema era el Politburó (conocido entonces como el Presídium del Comité Central), formado por un pequeño grupo de oficiales del Partido Comunista que podían rechazar cualquier propuesta. En aquella época, Anastas Mikoyan era el miembro del Politburó responsable de la salud pública. No era médico, sino una figura política que venía de la revolución. Sin embargo, él y mi padre se conocían bien. Mikoyan debió colocarle al frente de la iniciativa de la polio como tema prioritario». Chumakov, que no aceptaba la negativa del ministro para ensayar la vacuna oral, cogió uno de los teléfonos rojos reservados únicamente para las personas más poderosas del Kremlin —entre las cuales no se hallaba— y marcó el número de Mikoyan.

Tal y como Chumakov relató la historia a su hijo, fue directo al asunto y preguntó a Mikoyan si aprobaba los ensayos con la vacuna de virus vivos.

«¿Estás seguro de que se trata de una buena vacuna, Mikhail?», preguntó Mikoyan. «¿Y es inocua?»

«Sí», contestó el virólogo. «Estoy completamente seguro».

«Entonces, adelante», dijo Mikoyan.

«Y así fue», dice el joven Chumakov, cuyo relato coincide con el de otras personas que conocían a los dirigentes. «El único permiso que obtuvo fue verbal, gracias a esa línea directa con el Politburó. Por supuesto, el ministro de sanidad se molestó, pero no pudo hacer nada en contra».

ÉXITO DURADERO

En 1959, Chumakov ensayó la vacuna oral en diez millones de niños de toda la Unión Soviética. Se instauraron centros de vacunación no solo en los hospitales y clínicas, sino también en colegios, guarderías y otros establecimientos no sanitarios. Durante los meses siguientes, casi todos los menores de veinte años (unos cien millones de personas) recibieron la vacuna, bien con un cuentagotas o con un terrón de azúcar. El resultado justificó el esfuerzo realizado. Chumakov se mostró eufórico con la aplicación generalizada del medicamento. Un año después, un representante de la OMS reconoció la seguridad de la vacuna y la importante disminución de los casos de parálisis.

Algunos científicos occidentales se negaron a aceptar los brillantes informes procedentes del otro lado del telón de acero. La reacción habitual, por lo general no expresada en público, era de desconfianza, solía quejarse Sabin. En última instancia, el logro documentado de la colaboración entre Sabin y Chumakov triunfó sobre las diferencias ideológicas. Su vacuna oral de virus vivos se convirtió en el instrumento de elección contra la polio en todo el mundo. En EE.UU. lo fue durante tres decenios, después de obtener la licencia federal definitiva en 1962. En 1972, Sabin donó sus cepas de poliovirus a la OMS, con el fin de fabricar una vacuna accesible para los países más pobres.

En la actualidad, la polio constituye una enfermedad grave solo en ciertos lugares de Pakistán, Afganistán y Nigeria. Si se logra erradicarla del planeta, lo que cada vez parece más factible, el mundo deberá agradecérselo a la poco conocida e insólita colaboración entre Albert Sabin y Mikhail Chumakov.

PARA SABER MÁS

Vaccines for poliomyelitis. Jonas E. Salk en *Scientific American*, vol. 192, n.º 4, págs. 42-44, abril de 1955.

Estructura de los poliovirus. James M. Hogle, Marie Chow y David J. Filman en *Investigación y Ciencia*, n.º 128, págs. 22-30, mayo de 1987.

Polio: An American story. David M. Oshinsky. Oxford University Press, 2006.

Centro Hauck para los archivos de Albert B. Sabin, Universidad de Cincinnati: **sabin.uc.edu**



Steven Carlip es profesor en la Universidad de California en Davis y uno de los principales expertos en el estudio de la gravedad en dos dimensiones. Realizó su tesis doctoral con Bryce DeWitt, pionero en el desarrollo de las teorías de gravedad cuántica.

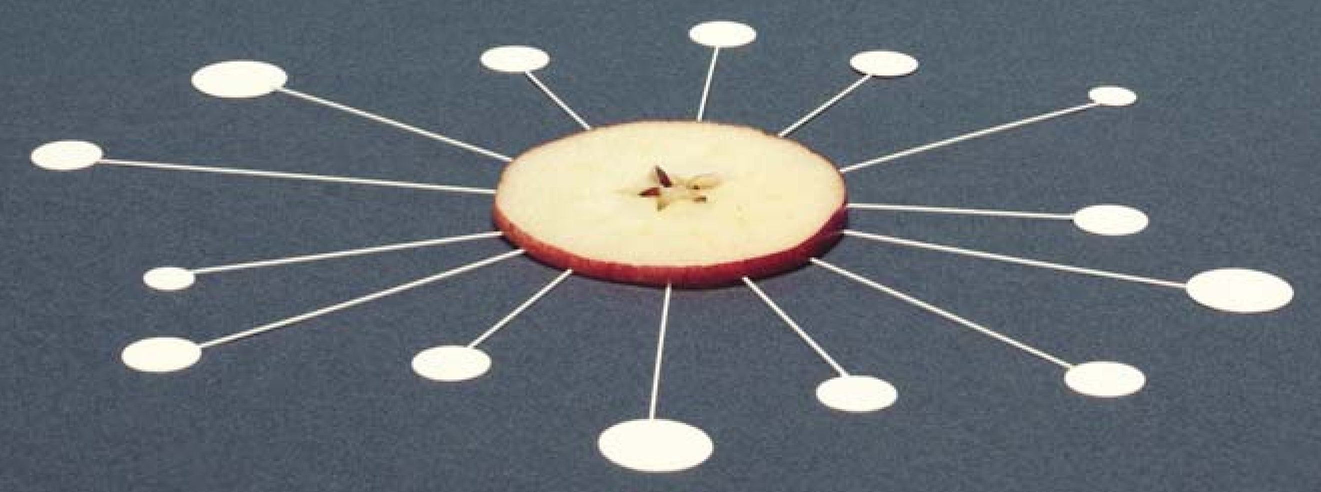
FÍSICA

Gravedad cuántica en dos dimensiones

Imagine que el espacio tuviese solo dos dimensiones en lugar de tres. ¿Cómo se manifestaría la fuerza de la gravedad? Las respuestas a esta pregunta quizás allanen el camino hacia una teoría unificada de la naturaleza

Steven Carlip

KYLE BEAN



La física ha buscado siempre la unidad en la naturaleza. Isaac Newton demostró que la misma fuerza que hacía caer una manzana era la que mantenía a los planetas en sus órbitas. James Clerk Maxwell combinó la electricidad, el magnetismo y la luz en una única teoría del electromagnetismo. Un siglo después, a esta se sumaba la fuerza nuclear débil para dar lugar a una teoría de la interacción electrodébil. Albert Einstein unió el tiempo y el espacio en un continuo espaciotemporal.

En la actualidad, el escollo más importante en ese camino hacia la unificación procede de las dificultades para unificar la gravedad y la mecánica cuántica. La teoría de la gravitación formulada por Einstein, la teoría de la relatividad general, explica el nacimiento del universo, las órbitas de los planetas y la caída de una manzana. La mecánica cuántica describe el comportamiento de átomos y moléculas, los electrones, los quarks y las fuerzas subatómicas. Sin embargo, en el régimen en el que ambas teorías deberían solaparse (cuando los efectos gravitatorios y los cuánticos son intensos, como en los agujeros negros), parecen incompatibles. Hasta ahora, todos los intentos de combinarlas en una teoría cuántica de la gravedad arrojan conclusiones sin sentido. Después de 80 años de trabajo por parte de varias generaciones de físicos, entre quienes se incluyen varios premios nóbel, la gravedad cuántica se nos sigue escapando de las manos.

Si plantea a un físico una cuestión complicada, este le replicará de inmediato que pregunte algo más sencillo. La física avanza gracias al estudio de modelos simples que describen ámbitos reducidos de una realidad más compleja. También para estudiar la gravedad cuántica se han propuesto varios modelos simplificados, como algunas aproximaciones que resultan válidas cuando la gravedad es débil, u otras aplicables a casos muy especiales, como los agujeros negros. Pero puede que la simplificación menos habitual consista en ignorar por completo una dimensión del espacio y estudiar cómo se manifestaría la gravedad si el universo fuese bidimensional. (En jerga técnica, estos modelos se denominan «(2 + 1)-dimensionales», en referencia a que poseen dos dimensiones espaciales, más el tiempo.) La motivación para investigar dicho modelo reside en que algunos de los principios que rigen la gravedad en un universo bidimensional podrían resultar válidos también en el nuestro. En tal caso, quizás obtendríamos valiosas pistas sobre cómo avanzar hacia una teoría unificada.

En su obra *Planilandia, una novela de muchas dimensiones*, escrita en 1884, Edwin Abbott narra las aventuras de un cuadrado que habita en un mundo bidimensional poblado de líneas, triángulos y otras figuras geométricas. Aunque Abbott pretendía escribir una sátira sobre la sociedad victoriana (Planilandia se halla sometida a una rígida jerarquía de clases, en la que las mujeres son líneas rectas relegadas a la base y una clase de sacerdotes circulares ocupa las posiciones más altas), la novela contribuyó a aumentar el interés por cuestiones geométricas en espacios con otro número de dimensiones. Para hacerse una idea de cómo sería un mundo de más de tres dimensiones, un recurso útil suele ser imaginarse cómo percibirían los habitantes de Planilandia nuestro mundo tridimensional [*véase* «La hiperesfera», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011]. Planilandia ha inspirado también a quienes estudian materiales como el grafeno, que se comportan como auténticos espacios bidimensionales [*véase* «Grafeno», por André K. Geim y Philip Kim; Investigación y Ciencia, junio de 2008].

Los primeros estudios sobre la gravedad en dos dimensiones se acometieron durante los años sesenta del siglo pasado. Sus resultados fueron decepcionantes: en un espacio bidimensional no hay —literalmente— espacio suficiente para que se propaguen las variaciones del campo gravitatorio. Sin embargo, hacia finales del decenio de los ochenta se descubrió que, aunque no se propagase, la gravedad en dos dimensiones sí podía ejercer otros efectos. Este campo de investigación constituye un buen ejemplo de pensamiento lateral, que nos ha permitido tratar con métodos matemáticos rigurosos algunas de nuestras ideas más atrevidas, como el principio holográfico o la aparición del tiempo.

ADMINISTRAR EL TIEMPO

Para formular la versión cuántica de una interacción, el punto de partida es la teoría clásica correspondiente. La teoría clásica de la gravedad nos la proporciona la relatividad general, y es ahí donde comienzan los problemas. La relatividad general se basa en un sistema de diez ecuaciones diferenciales, cada una de las cuales puede llegar a incluir miles de términos. Dado que resolverlas de forma completamente general resulta imposible, al intentar construir su versión cuántica nos enfrentamos a un reto abrumador. Sin embargo, hay una razón aún más profunda por la que la gravedad cuántica se muestra tan esquiva. De acuerdo con la relatividad general, la gravedad no es sino una manifestación de la geometría del espacio y el tiempo. La Tierra gira alrededor del Sol no porque exista una fuerza que tire de ella, sino porque recorre el camino más recto posible en un espaciotiempo cuya geometría ha sido deformada por la masa del Sol. Por tanto, unir la mecánica cuántica y la gravedad supone, en cierto sentido, cuantizar la estructura del espacio y el tiempo.

EN SÍNTESIS

Ante las dificultades para compatibilizar la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad general de Einstein, una estrategia consiste en considerar una versión simplificada del problema e imaginar que el espacio es bidimensional.

En un principio, los expertos pensaron que semejante teoría carecería de procesos dinámicos de interés. En una dimensión menos, la gravedad no puede generar ondas gravitacionales, por lo que su versión cuántica carecería de sentido.

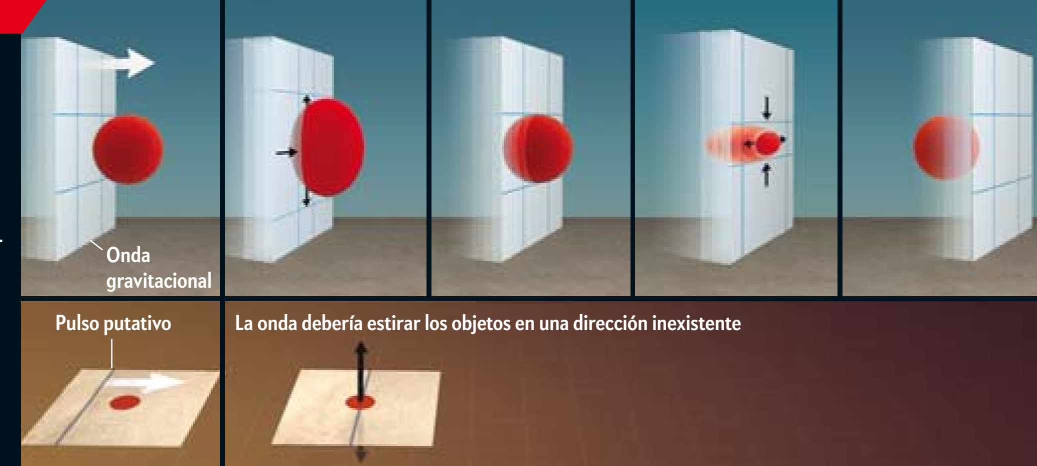
A finales del siglo pasado los físicos se percataron de que, después de todo, la gravedad cuántica en dos dimensiones no resulta tan trivial: no incluye la propagación de ondas gravitacionales, pero sí la dinámica del universo como un todo.

Así funciona la gravedad en dos dimensiones

Si aplanásemos el espacio tridimensional hasta eliminar por completo una de sus dimensiones, la fuerza de la gravedad se comportaría de forma fundamentalmente distinta. A pesar de ello, este modelo simplificado permite obtener pistas muy valiosas para hacer frente al problema de unificar la gravedad y la mecánica cuántica en el mundo real.

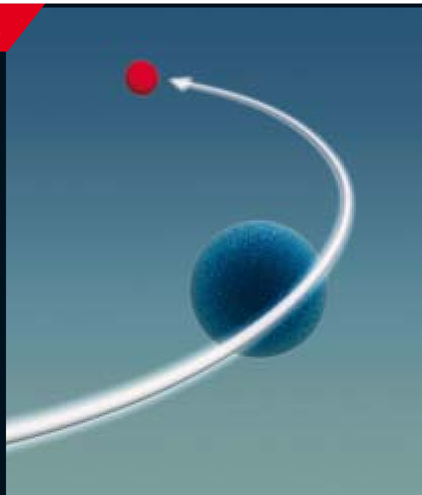
Ausencia de ondas

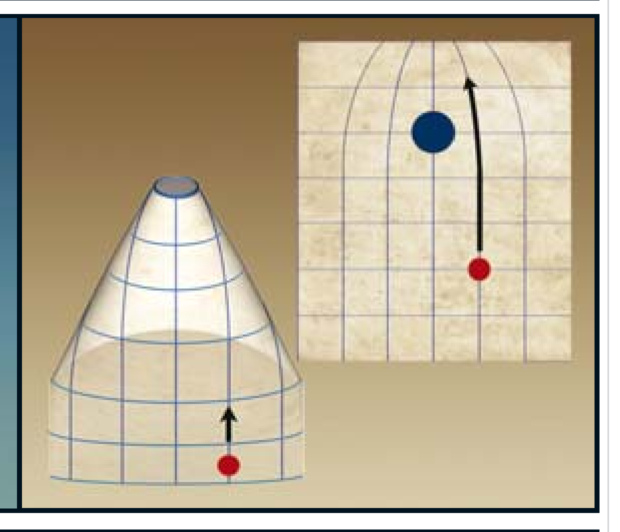
De acuerdo con la relatividad general, los cambios en el campo gravitatorio se propagan en forma de ondas gravitacionales. Este tipo de ondas oscilan en dos direcciones perpendiculares a aquella en la que se propagan (*arriba*), por lo que no pueden existir en dos dimensiones (*abajo*). Las ondas suelen ser el punto de partida a la hora de cuantizar una teoría.



Otra ley de atracción

Un objeto con masa deforma el espaciotiempo que lo rodea. En tres dimensiones (*izquierda*), esa distorsión hace que dos objetos se atraigan de acuerdo con la ley de la gravitación universal de Newton. En dos dimensiones (*derecha*), un objeto con masa confiere al espacio circundante una forma cónica. La ley de Newton cambia: dos objetos en reposo no se alteran, solo cuando se mueven se desvían sus caminos.

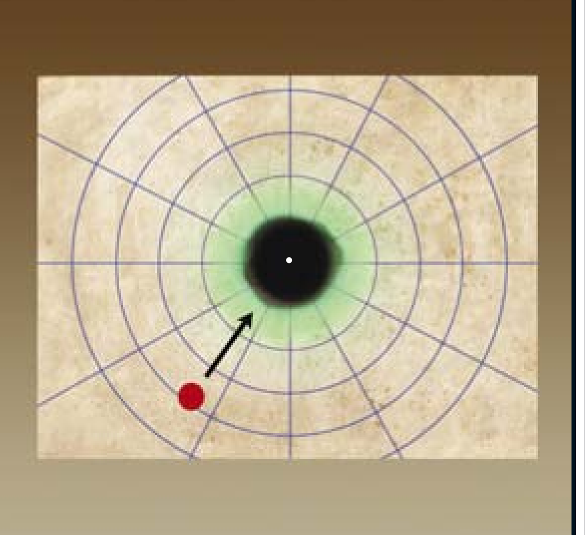




Agujeros negros

La relatividad general predice la existencia de agujeros negros, regiones del espacio en las que un cuerpo puede entrar, pero nunca salir. Para sorpresa de numerosos expertos, en 1992 se descubrió que también la gravedad en dos dimensiones permite la existencia de agujeros negros, siempre y cuando el universo contenga energía oscura. Los efectos cuánticos por medio de los cuales los agujeros negros emiten partículas operan de manera análoga en dos y tres dimensiones.





ILUSTRACIONES DE MALCOLM GODWIN

Una de las piedras angulares de la mecánica cuántica es el principio de incertidumbre de Heisenberg. Según este, las magnitudes físicas resultan «borrosas» en un sentido intrínseco. Fluctúan de manera aleatoria y carecen de un valor definido hasta que son observadas o sometidas a un proceso físico equivalente. Por tanto, en una teoría cuántica de la gravedad, el espacio y el tiempo deberían fluctuar. Pero ello zarandea los cimientos sobre los que se apoya el resto de la física: sin un espaciotiempo fijo como un telón de fondo, ignoramos cómo describir posiciones, velocidades de cambio o cualquier otra magnitud básica. En pocas palabras, desconocemos el significado de un espaciotiempo cuántico.

Esas dificultades genéricas se manifiestan en la teoría de varias guisas. Una de ellas es el problema del tiempo, un concepto fundamental para dar cuenta de la realidad que observamos. Casi todas las teorías físicas versan, en definitiva, sobre la manera en que alguna parte del universo evoluciona con el tiempo. Por tanto, los físicos deberíamos conocer con precisión el significado de aquello que denominamos «tiempo», pero la embarazosa realidad es que no lo sabemos. Para Newton, el tiempo marcaba algo absoluto y externo a la naturaleza que, si bien afectaba a la materia, no se dejaba influir por ella. Las formulaciones habituales de la mecánica cuántica aceptan esta idea de un tiempo absoluto. La teoría de la relatividad, sin embargo, desterró dicha concepción: dos observadores en movimiento relativo difieren sobre la manera en la que cada uno percibe el paso del tiempo, o incluso sobre si dos sucesos ocurren o no de manera simultánea. Las agujas de un reloj (o cualquier otra cosa que cambie con el tiempo) se mueven con mayor lentitud en un campo gravitacional intenso. Para la relatividad, el tiempo deja de ser un parámetro externo y comienza a desempeñar un papel activo en el universo. Pero, si no existe un reloj externo que fije el paso del tiempo, ¿cómo emerge este a partir de la estructura interna del universo?

El problema del tiempo guarda una estrecha relación con otro menos conocido: el de los observables. La física, como ciencia empírica, debe hacer predicciones verificables sobre cantidades observables. En la física ordinaria, dichas cantidades se encuentran adscritas a lugares específicos: la intensidad del campo eléctrico «aquí» o la probabilidad de encontrar un electrón «allá». Por ello, denotamos «aquí» y «allá» con las coordenadas x, y y z, y nuestras teorías predicen la manera en que los observables dependen de esas coordenadas. Según Einstein, sin embargo, las coordenadas espaciales no suponen más que una etiqueta arbitraria elegida por la mano caprichosa del hombre: en último término, al universo no le importan. Pero si no podemos identificar de manera objetiva un punto del espaciotiempo, ¿cómo afirmar que sabemos lo que pasa allí? Charles Torre, de la Universidad estatal de Utah, demostró que una teoría cuántica de la gravedad no puede constar de observables puramente locales; es decir, aquellos cuyo valor depende de lo que sucede en un solo punto del espaciotiempo. Por tanto, habremos de conformarnos con observables no locales, cuyos valores dependen de varios puntos a la vez. El problema reside en que ni siquiera sabemos cómo definir tales objetos, ni cómo emplearlos para describir el mundo que observamos.

Un tercer problema tiene que ver con el origen del universo: ¿surgió de la nada, se escindió a partir de un universo progenitor u ocurrió algo completamente distinto? Cada posibilidad plantea sus propias dificultades. A su vez, esta pregunta guarda relación con uno de los temas favoritos de los escritores de ciencia ficción: los agujeros de gusano, pasadizos que permiten atajar entre lugares diferentes del espacio e incluso del tiempo. Esta idea ha sido considerada con seriedad por los investigadores (durante los últimos veinte años, se han escrito más de un millar de artículos científicos sobre los agujeros de gusano); sin embargo, nadie ha llegado todavía a una conclusión definitiva acerca de su existencia.

Por último, toda teoría que pretenda describir las propiedades cuánticas del espaciotiempo deberá hacer frente a las preguntas que plantea uno de los objetos más misteriosos que se conocen: los agujeros negros. En ellos quizá resida nuestra mejor oportunidad para desentrañar la naturaleza última del espacio y el tiempo. Al incluir algunos efectos cuánticos, Stephen Hawking demostró en 1974 que los agujeros negros deberían emitir radiación de modo parecido a como lo hace un pedazo de carbón caliente (lo que en lenguaje técnico se conoce como «radiación de cuerpo negro»), lo que implica que se les puede asignar una temperatura. En cualquier otro sistema físico, la temperatura refleja el comportamiento de sus constituyentes microscópicos. Cuando decimos que en una habitación hace calor, lo que sucede es que las moléculas del aire se mueven con gran rapidez. En un agujero negro, esas «moléculas» deberían ser de índole gravitatoria y cuántica. Por supuesto, no hablamos de moléculas en un sentido literal, sino de lo que un físico denominaría los *grados de libertad* del sistema: subestructuras microscópicas susceptibles de cambio, cuya identidad, en el caso de los agujeros negros, desconocemos por completo.

UN MODELO POCO ATRACTIVO

A primera vista, un universo con solo dos dimensiones parece un lugar poco prometedor para buscar respuestas a las preguntas que acabamos de enumerar. En 1963, Andrzej Staruszkiewicz dedujo, a partir de la relatividad general, el aspecto que debería presentar la gravedad en un mundo bidimensional. Descubrió que, en un universo así, un objeto dotado de masa conferiría al espacio circundante la forma de un cono. Una partícula que pasase por el vértice del cono se vería desviada de su camino de modo no muy distinto a como el Sol modifica la trayectoria de un cometa. En 1984, Stanley Deser, de la Universidad de Brandeis, Roman Jackiw, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Gerard't Hooft, de la Universidad de Utrecht, estudiaron la dinámica de una partícula cuántica en un espacio con esas características.

Dicha geometría resulta mucho más simple que los complicados patrones geométricos que genera la gravedad en nuestro universo tridimensional. En dos dimensiones desaparece el equivalente a la ley de atracción de Newton: dos cuerpos en reposo no sienten atracción mutua. En cambio, la intensidad de la fuerza gravitatoria depende de la velocidad del objeto. Esta simplicidad parece sugerir que cuantizar la teoría de Staruszkiewicz debería resultar más sencillo que cuantizar la relatividad general en tres dimensiones. Pero, por desgracia, la teoría se muestra *demasiado* simple. En dos dimensiones no queda nada que cuantizar, ya que la gravedad bidimensional carece de un elemento clave de la teoría de Einstein: las ondas gravitacionales.

Consideremos un caso más sencillo: el electromagnetismo. Los campos eléctricos y magnéticos son producidos por cargas y corrientes eléctricas. Maxwell demostró que estos campos se propagan en forma de ondas de luz. En la versión cuántica de la teoría de Maxwell, las ondas se convierten en cuantos de luz, los fotones. Según la relatividad general, también el campo gravitatorio puede propagarse en forma de ondas gravitacionales. Por ese motivo, la mayoría de los físicos dan por sentado que

toda teoría cuántica de la gravedad debería contener ciertas partículas, los gravitones, que desempeñarían un papel análogo al de los fotones en el electromagnetismo.

Una onda de luz posee una polarización: su campo eléctrico oscila en una dirección perpendicular a la de propagación. Una onda gravitacional también, pero su polarización es más compleja: el campo gravitatorio vibra no en una, sino en dos direcciones perpendiculares a la de propagación. Esta clase de comportamiento sencillamente no cabe en dos dimensiones, pues una vez fijada la dirección de propagación, solo queda una dirección perpendicular. Las ondas gravitacionales y sus contrapartidas cuánticas, los gravitones, no se dejan encorsetar en dos dimensiones espaciales.

Salvo por algunas muestras de interés ocasionales, el descubrimiento de Staruszkiewicz fue languideciendo hasta que, en 1989, Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, retomó la idea. Witten, uno de los físicos matemáticos más reputados, había estado estudiando un tipo especial de teorías de campos en las que las ondas no se propagan libremente. Cuando se percató de que la gravedad en dos dimensiones pertenecía a esa categoría, añadió un elemento esencial que no había sido considerado hasta entonces: la topología.

UN MUNDO COMO UNA ROSQUILLA

Witten descubrió que, aunque en dos dimensiones la gravedad no se propague en forma de onda, puede aún ejercer un efecto clave sobre la forma global del espacio. Pero tal comportamiento no se manifiesta si el espacio adopta la geometría de un plano: debe exhibir una topología más compleja.

Cuando una escultura de hielo se funde, sus detalles se difuminan con rapidez, pero ciertas características, como los agujeros, tienden a permanecer durante más tiempo. La topología es la rama de la matemática que describe esa clase de características. Dos superficies poseen la misma topología si una de ellas puede deformarse suavemente hasta tomar la forma de la otra, sin necesidad de cortarla, desgarrarla o pegarla. Un hemisferio y un disco, por ejemplo, poseen la misma topología: basta con estirar el primero para obtener el segundo. Una superficie esférica, en cambio, presenta una topología distinta, ya que para convertirla en un hemisferio o en un disco habría que recortar un trozo. Un toro (la superficie de una rosquilla) muestra otra topología. La superficie de una taza de café tiene la misma topología que un toro: el asa se asemeja a una rosquilla y el resto de la taza puede encogerse gradualmente hasta hacerla desaparecer sin cortar ni desgarrar nada (he aquí el origen del conocido chiste acerca de un topólogo que es incapaz de distinguir una rosquilla de una taza de café).

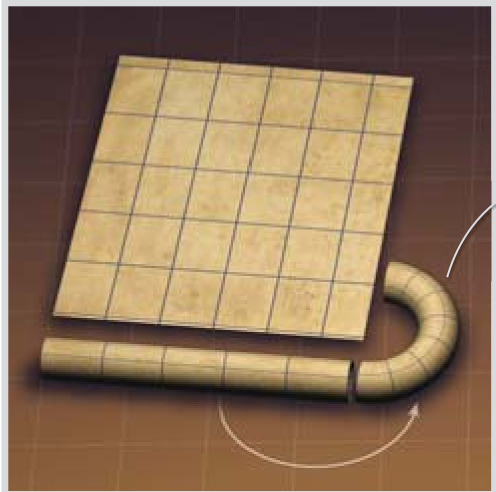
Aunque visto desde el exterior un toro nos parezca una figura curva, desde el punto de vista de su geometría interna se trata, en realidad, de un objeto plano. Lo que lo convierte en un toro es el hecho de que, si nos desplazamos sobre su superficie, podemos regresar al punto de partida a través de dos direcciones distintas: pasando por el agujero o a lo largo del anillo. Esta característica le resultará familiar a cualquier aficionado a los videojuegos de los años ochenta, en los que los personajes que salían por el lado derecho de la pantalla reaparecían por el izquierdo. La pantalla es plana porque obedece las reglas de la geometría euclídea (por ejemplo, dos líneas paralelas jamás se cortan), pero su topología es toroidal.

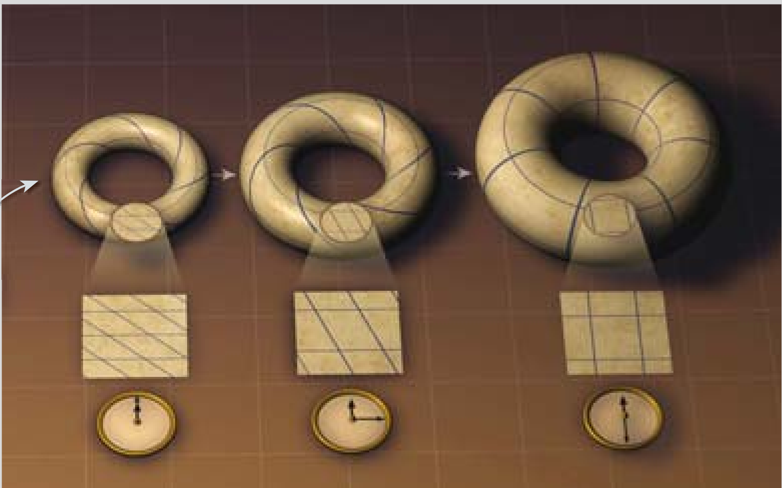
Existe una familia infinita de toros, todos ellos planos pero diferentes entre sí. Sus distintos miembros se caracterizan por un parámetro llamado *módulo*. En un universo toroidal sometido a los efectos de la gravedad, es el módulo lo que evoluciona con el tiempo. En el equivalente a la gran explosión de nuestro universo, el toro comenzaría siendo una línea y, poco a poco, iría ensanchándose. A partir de los resultados de Witten, hace

GRAVEDAD Y TOPOLOGÍA

Efectos sobre todo el universo

En dos dimensiones, la gravedad no se propaga a través del espacio. Sin embargo, puede provocar cambios que afectan a la forma global del universo. Se han estudiado sus efectos en el caso de un hipotético universo bidimensional con la topología de un toro (la superficie de una rosquilla). Toros de distintos tamaños y formas se corresponderían en ese universo con diferentes instantes a lo largo del tiempo. Microcosmos y macrocosmos quedan así vinculados: lo que sucede en una porción del universo refleja sus propiedades globales.





unos años demostré que ese proceso se podía cuantizar: la gravedad cuántica en dos dimensiones no es una teoría de gravitones, sino de toros de formas cambiantes. Esta imagen marca un antes y un después en nuestro concepto de teoría cuántica como aquella que describe el mundo a escalas diminutas. En dos dimensiones, la gravedad cuántica aparece como una teoría que trata todo el universo como un único objeto. Esta teoría ya resulta lo suficientemente rica como para afrontar algunos de los problemas conceptuales que plantea la gravedad cuántica tridimensional.

La gravedad cuántica en dos dimensiones nos indica la manera en que el tiempo puede emerger a partir de una realidad que, en esencia, es atemporal. En una de las formulaciones de la teoría, todo el universo queda descrito por una única función de onda cuántica, similar a las que solemos emplear para describir partículas y átomos. Dicha función de onda no depende del tiempo, puesto que ya incluye en un bloque todo el pasado, el presente y el futuro. Pero, de alguna forma, esa función de onda atemporal origina el cambio que vemos en el mundo. La clave reside en recordar el aforismo de Einstein: el tiempo es lo que mide un reloj. No se trata de algo externo, ajeno al funcionamiento del cosmos, sino que queda especificado por un subsistema que guarda alguna correlación con el resto del universo, como ocurre entre un reloj de pared y la rotación de la Tierra.

La teoría permite escoger entre muchos relojes diferentes: cuál elijamos determinará lo que entenderemos por «tiempo». Un habitante de un mundo bidimensional podría definir el tiempo a través de los relojes atómicos de los satélites de su sistema de posicionamiento global, como nuestro GPS. O tal vez decidiese denotar cada instante de acuerdo con la longitud de las curvas que lo unen con la gran explosión, según el tamaño del universo en ese instante, o por el valor del desplazamiento hacia el rojo producido por la expansión de su universo. Una vez hecha la elección, todos los observables físicos cambiarán de acuerdo con el tiempo que marque el reloj. Por ejemplo, el módulo de un universo toroidal guarda relación con su tamaño, y eso se percibiría como una evolución temporal. Aunque estas ideas no son nuevas, la gravedad cuántica en un universo con la topología de un toro nos ha brindado un marco con el que calcular de manera rigurosa ciertas cantidades.

En cuanto al problema de los observables, un universo toroidal nos ofrece un conjunto de parámetros que pueden medirse de manera objetiva: los módulos. Su particularidad reside en que son cantidades no locales, ya que dependen de la estructura del espacio en su conjunto. Al final, todo lo que midamos será un sustituto de dichas cantidades no locales. Hace un tiempo, hallé la manera de relacionar dichos módulos con el movimiento de los objetos. En 2008, Catherine Meusburger, ahora en la Universidad de Erlangen-Nürnberg, descubrió que los módulos se relacionan también con mediciones cosmológicas reales, como dilataciones temporales o el desplazamientos al rojo de los rayos de luz.

Por último, la gravedad en dos dimensiones trae buenas noticias para los aficionados a los agujeros de gusano: al menos una de las formulaciones de la teoría permite cambios en la topología del espacio. Un habitante bidimensional podría irse a dormir en un universo esférico y levantarse en otro con forma de rosquilla, lo que equivale a crear un atajo entre dos puntos muy distantes del universo. En algunas versiones de la teoría se puede incluso describir el cambio de topología más abrupto imaginable: la creación del universo a partir de la nada.

AGUJEROS NEGROS

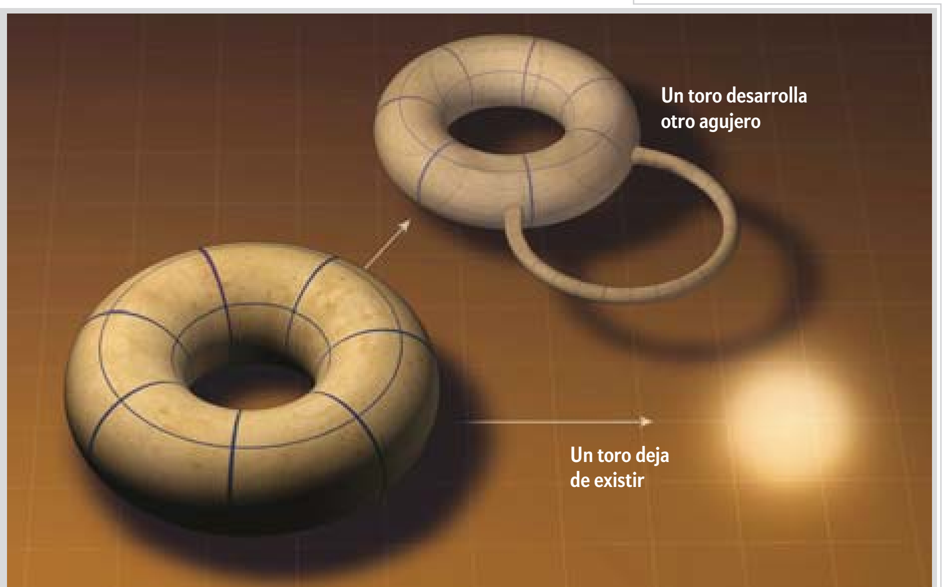
Dado que la gravedad en dos dimensiones presenta una dinámica atrofiada, los expertos estábamos convencidos de que los agujeros negros bidimensionales no podrían existir. En 1992, sin embargo, Máximo Bañados, ahora en la Pontificia Universidad Católica de Chile, Claudio Bunster (entonces Claudio Teitelboim) y Jorge Zanelli, ambos del Centro de Estudios Científicos de Valdivia, conmocionaron a la comunidad al demostrar que la teoría sí permite que haya agujeros negros, siempre y cuando el universo contenga cierto tipo de energía oscura.

Los agujeros negros en dos dimensiones guardan bastantes semejanzas con los de nuestro universo. Se forman cuando la materia colapsa por efecto de su propio peso, tras lo cual quedan rodeados por un horizonte de sucesos, una barrera unidireccional (en este caso, una línea) de la que nada puede esca-

GRANDES EXPLOSIONES Y AGUJEROS DE GUSANO

Cambios de topología

La gravedad en dos dimensiones admite cambios en la topología del universo: por ejemplo, un toro con un agujero podría convertirse en otro con dos. Estos procesos equivalen a crear agujeros de gusano, «atajos» espaciotemporales que llevan de un lugar a otro. El universo también puede dejar de existir de repente o nacer de la nada más absoluta.



par. Para un observador externo, un horizonte de sucesos se comporta como si se tratase de una frontera del universo, ya que todo objeto que lo traspase pierde para siempre el contacto con el resto del mundo. También en este caso, los cálculos indican que un agujero negro en dos dimensiones debería emitir radiación de Hawking a una temperatura que depende de su masa y su momento angular.

Sin embargo, ese resultado nos conduce a un nuevo enigma. Dado que la gravedad en dos dimensiones no posee ni ondas gravitacionales ni gravitones, tampoco deberían existir los grados de libertad gravitatorios que dan cuenta de la temperatura de un agujero negro. Pero, de algún modo, estos consiguen filtrarse en la teoría. Ello se debe a que el propio horizonte de sucesos aporta una estructura adicional, de la que el espacio bidimensional vacío carece. El horizonte se halla localizado en cierto lugar, lo que, en un sentido matemático, añade varias magnitudes a la teoría original. Las vibraciones del horizonte aportan grados de libertad complementarios. Con todo, no deja de sorprender que con ellos puedan reproducirse a la perfección los resultados de Hawking.

En vista de que los grados de libertad aparecen como una característica del horizonte, puede decirse que residen en la frontera del espacio, la cual posee una dimensión menos que el espacio total. Por tanto, nos encontramos ante una encarnación muy concreta del principio holográfico, una propuesta fascinante que muchos consideran clave para entender la gravedad cuántica. Dicho principio cuestiona el concepto de dimensión. Al igual que un holograma codifica en una placa de solo dos dimensiones toda la información necesaria para reconstruir una imagen tridimensional, numerosos expertos creen que la física de un mundo d-dimensional podría estar codificada en una teoría en d-1 dimensiones. En el contexto de la teoría de cuerdas, esta idea condujo a finales de los años noventa a un enfoque completamente novedoso para construir una teoría cuántica de la gravedad [*véase* «El espacio, ¿una ilusión?», por Juan Maldacena; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2006].

La gravedad en dos dimensiones nos proporciona un escenario simplificado con el que poner a prueba dicho principio. Hace unos cuatro años, Witten y Alexander Maloney, de la Universidad McGill, volvieron a causar sorpresa al sugerir que, en el modelo más simple de gravedad bidimensional, las predicciones holográficas fallarían. La teoría parece predecir propiedades térmicas sin sentido para los agujeros negros. Este resultado indicaría que la gravedad constituye un fenómeno aún más sutil de lo que creíamos. Las reacciones ante este problema han generado una nueva ola de actividad investigadora. Quizá la gravedad carezca de sentido por sí misma y solo lo adquiera al combinarse con otros campos y partículas, o puede que la teoría de Einstein deba ser revisada. Tal vez necesitemos añadir algunos grados de libertad locales, o quizás el principio holográfico no siempre funcione. O puede que el espacio, al igual que el tiempo, no constituya un ingrediente fundamental del universo. Pero, sea cual sea la respuesta, el estudio de la gravedad en dos dimensiones nos habrá guiado hacia una dirección que, de otro modo, quizá no habríamos tomado jamás.

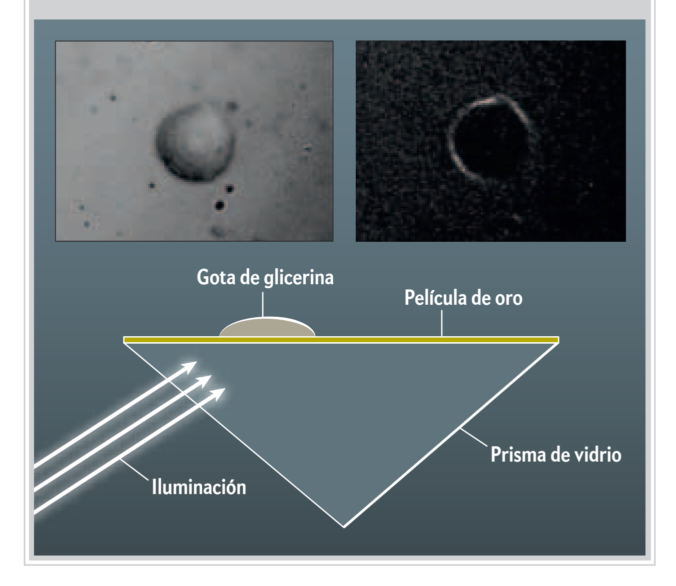
Aunque resulte imposible crear un agujero negro realmente bidimensional, algunas de las predicciones de la teoría tal vez puedan comprobarse experimentalmente. Algunos laboratorios trabajan en sistemas bidimensionales análogos a los agujeros negros. Por ejemplo, un fluido que se desplaza a mayor velocidad que el sonido genera un horizonte de sucesos del que las ondas sonoras no pueden escapar. Otros equipos han logrado imitar las propiedades de los agujeros negros bidimensionales por medio de ondas electromagnéticas confinadas en ciertas superficies. Tales sistemas análogos deberían, asimismo, emitir radiación de manera muy similar a la predicha por Hawking.

La gravedad cuántica en dos dimensiones comenzó como un divertimento para los físicos, un marco simple en el que explorar la gravedad cuántica del mundo real. Pero nos ha brindado lecciones muy valiosas sobre el tiempo, los observables y la topología del espacio, las cuales pueden trasladarse a la gravedad tridimensional real. El modelo sorprende por su riqueza: la inesperada importancia de la topología, sus notables agujeros negros y sus extrañas propiedades holográficas. Quizá pronto comprendamos qué significa ser un cuadrado en un mundo plano.

ANÁLOGOS EXPERIMENTALES

Planilandia en el laboratorio

Igor I. Smolyaninov, de la Universidad de Maryland, y sus colaboradores han desarrollado un sistema experimental que emula las propiedades de la gravedad en dos dimensiones por medio de una superficie de metal por la que se propagan las ondas electromagnéticas. Estos análogos bidimensionales de la luz reciben el nombre de plasmones de superficie [*véase* «Plasmones superficiales», por F. J. García Vidal y Luis Martín Moreno; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2008]. Una gota líquida los atrapa del mismo modo en que un agujero negro tridimensional captura fotones. El análogo del horizonte de sucesos se ve como un anillo blanco (*abajo a la derecha*). Del mismo modo que los físicos teóricos consideran que la gravedad en dos dimensiones constituye un modelo útil para estudiar las teorías de unificación, los experimentales estudian estos sistemas bidimensionales por sus posibles aplicaciones prácticas en óptica.



PARA SABER MÁS

Quantum gravity in 2+1 dimensions. Steven Carlip. Cambridge University Press, 1998.
The planiverse: Computer contact with a two-dimensional world. A. K. Dewdney. Springer, 2001.
Quantum gravity in 2+1 dimensions: The case of a closed universe. Steven Carlip en *Living Reviews in Relativity*, vol. 8, 2005. **www.livingreviews.org/lrr-2005-1**
Glosario de gravedad cuántica en la página web del autor: **snurl.com/carlip**

NEUROCIENCIA

EL CEREBRO SOME

Los circuitos neuronales responsables del autocontrol consciente son sumamente vulnerables al estrés. Cuando no funcionan, la mente es incapaz de regular los impulsos primarios y se paraliza

Amy Arnsten, Carolyn M. Mazure y Rajita Sinha



TIDO A TENSIÓN



DAN SAELINGER

Amy Arnsten es profesora de neurobiología en la facultad de medicina de Yale. Sus investigaciones sobre los cambios moleculares en la corteza prefrontal asociados al estrés y al envejecimiento han dado lugar a tratamientos para varios trastornos mentales.

Carolyn M. Mazure es profesora de psiquiatría y psicología, así como decana de asuntos del profesorado en la facultad de medicina de Yale. Creó el centro de investigación interdisciplinar de salud femenina de Yale que hoy dirige.

Rajita Sinha dirige el Centro de Estrés de Yale, que estudia los efectos del estrés en la conducta. Es profesora de psiquiatría en la facultad de medicina de la misma universidad.



El examen de admisión a la facultad de medicina, un bombardeo de cientos de preguntas que dura cinco horas, suele dejar desconcertado y ansioso incluso al candidato mejor preparado. Para algunos futuros médicos, la incesante presión hace que su capacidad de razonamiento enlentezca o se pare por completo. La experiencia, a la que se refiere a menudo como asfixia, dolor de cabeza, nervios, temblor, abatimiento, pánico, mente en blanco u otros términos descriptivos, le resulta familiar a casi todo aquel que haya arruinado un discurso, se haya quedado paralizado al escribir o se haya enfrentado a un largo examen.

Durante decenios se creía conocer lo que sucedía en el cerebro durante un examen o en un campo de batalla. Pero en los últimos años, varias investigaciones han arrojado nueva luz sobre la fisiología del estrés. La respuesta al estrés no solo consiste en una reacción primitiva en la que intervienen ciertas partes del encéfalo presentes en una gran variedad de especies, desde la salamandra hasta los humanos. El estrés puede inutilizar nuestras facultades mentales más avanzadas, las regiones del cerebro más desarrolladas en los primates.

Los libros de texto de antaño explican que el hipotálamo, una estructura evolutivamente antigua alojada en la base del encéfalo, reacciona ante el estrés mediante la activación de la secreción de una serie de hormonas de la hipófisis y las glándulas suprarrenales, lo que acelera el ritmo cardíaco, eleva la presión arterial y disminuye el apetito. Ahora, una investigación ha revelado la influencia de la corteza prefrontal, la región situada justo detrás de la frente que sirve de centro de control de nuestras habilidades cognitivas superiores (entre ellas la concentración, la planificación, la toma de decisiones, la perspicacia, el juicio y la capacidad de recuperar recuerdos). Representa la parte del encéfalo que evolucionó más tarde y puede resultar sumamente sensible a ansiedades y preocupaciones, incluso las pasajeras y cotidianas.

Cuando las cosas van bien, la corteza prefrontal opera a modo de centro de control que mantiene a raya nuestras emociones e impulsos primarios. El nuevo estudio demuestra que el estrés agudo e incontrolable desencadena una serie de acontecimientos químicos que debilitan la influencia de la corteza prefrontal a la vez que favorecen la dominancia de las partes más ancestrales del encéfalo. En esencia, el control sobre el pensamiento y la emoción pasa de la corteza prefrontal al hipotálamo y otras estructuras más primitivas. En cuanto esas partes más antiguas toman el mando, nos encontramos consumidos por una ansiedad paralizante o sujetos a impulsos que habitualmente conseguimos controlar: nos abandonamos al exceso de comida, bebida, a las drogas o a un arrebato de consumismo.

El reconocimiento creciente de que el estrés agudo puede poner en grave peligro la función de las áreas ejecutivas superiores en el cerebro humano ha atraído el interés de los investigadores. No solo se intenta entender qué sucede en el cerebro cuando este se paraliza, sino que se están desarrollando intervenciones conductuales y farmacológicas que lo ayuden a mantener la compostura.

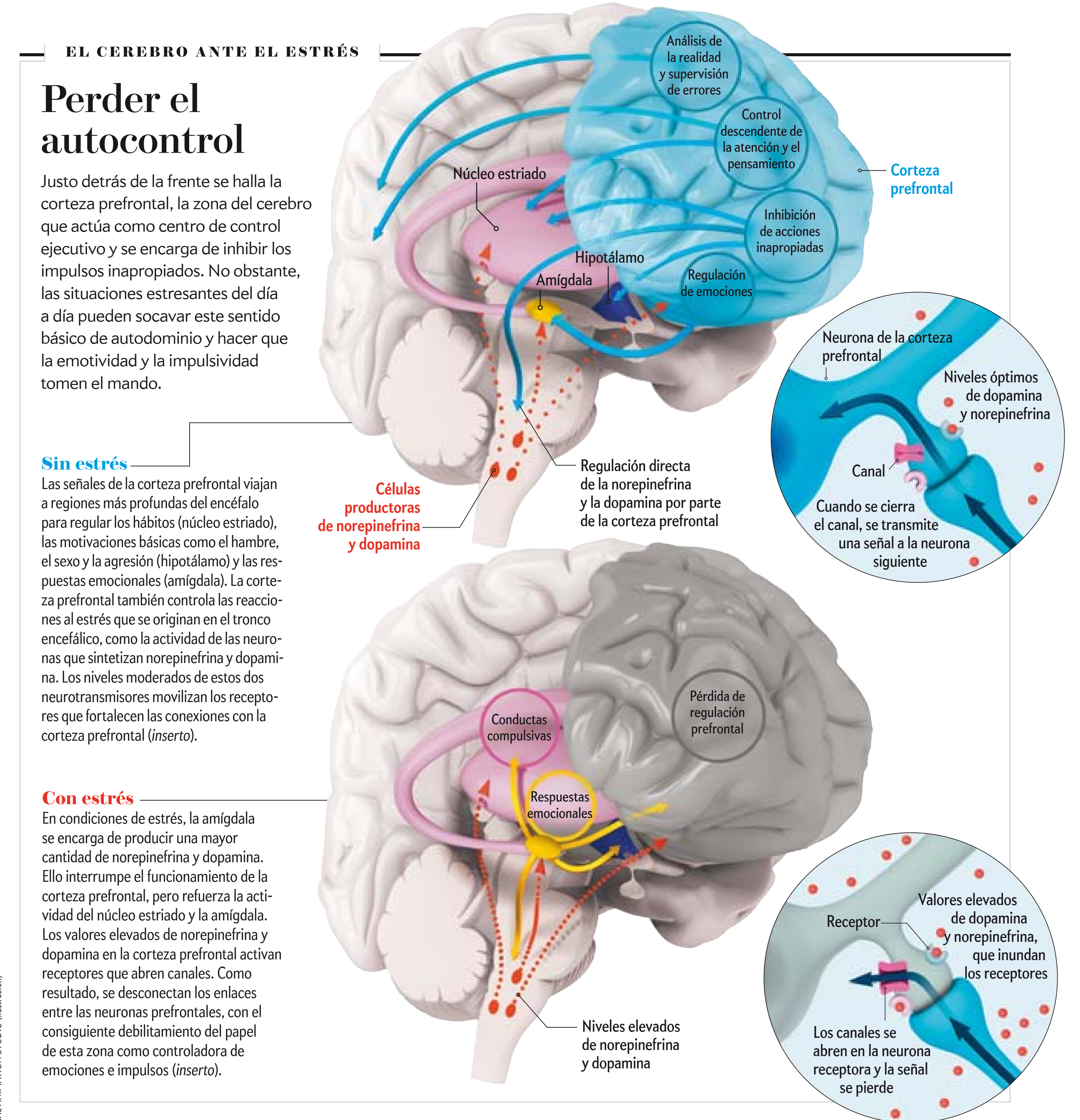
EN SÍNTESIS

Quedar paralizado ante el estrés, una situación que todos hemos experimentado alguna vez, tiene su origen en una pérdida del control sobre las funciones ejecutivas que nos permiten dominar nuestras emociones.

La región cortical prefrontal, que opera a modo de centro de control ejecutivo, contiene nuestras emociones mediante el envío de señales que reducen la actividad en los sistemas primitivos del encéfalo.

En situaciones cotidianas de estrés, la corteza prefrontal puede desactivarse y, la amígdala, un núcleo de regulación de la actividad emocional, toma las riendas, lo que induce bloqueo mental y pánico.

Se está explorando la fisiología del estrés agudo y se están evaluando intervenciones farmacológicas y conductuales que nos ayuden a recuperar la compostura cuando la partida se complica.



FUENTE: «STRESS SIGNALLING PATHWAYS THAT IMPAIR PREFRONTAL CORTEX STRUCTURE AND FUNCTION», POR AMY F. T. ARNSTEN, EN *NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE*, VOL. 10, JUNIO DE 2009; AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO (*ilustración*)

QUE NO CUNDA EL PÁNICO

La pérdida del autodominio ha fascinado a los científicos durante decenios. Después de la segunda guerra mundial, se examinó el motivo por el que los pilotos altamente cualificados cometían errores simples pero fatales al maniobrar su aeronave en el corazón de una batalla. Lo que sucede detrás del hueso frontal del cráneo humano permaneció oculto hasta la llegada de las técnicas de neuroimagen. En el escáner cerebral, el alboroto de actividad en la corteza prefrontal nos da una idea de cuán vulnerable resulta el principal centro de autocontrol.

La sensibilidad de esa zona se debe a su posición especial en la jerarquía de estructuras cerebrales. Representa la región del cerebro más evolucionada; de tamaño proporcionalmente mayor en humanos que en otros primates, corresponde a un tercio de la corteza humana. Se desarrolla más despacio que cualquier otra zona del cerebro y solo alcanza la madurez pasada la adolescencia. El área prefrontal alberga los circuitos neurales del pensamiento abstracto. Gracias a ella podemos concentrarnos y realizar una tarea, al tiempo que conservamos información de la memoria de trabajo en un bloc mental. Esa región de almacenamiento temporal de la memoria permite mantener «en mente» la información, como los dígitos que hay que desplazar a la siguiente columna cuando realizamos una suma. Como unidad de control mental, el área prefrontal inhibe también acciones y pensamientos inapropiados.

El centro ejecutivo neurológico funciona a través de una extensa red de conexiones entre ciertas neuronas de forma triangular, las células piramidales. Estas neuronas también establecen conexiones hacia destinos más lejanos del encéfalo que controlan nuestras emociones, deseos y hábitos. Cuando no sufrimos estrés, los circuitos de esa red operan con fluidez. La memoria de trabajo nos recuerda que debemos empezar una tarea con cierto plazo de entrega, y otro circuito envía mensajes a regiones inferiores del encéfalo para recomendarnos que no tomemos una segunda copa de vino. Mientras tanto, una señal de la amígdala, una estructura cerebral profunda que controla las reacciones de miedo, nos convence de que ese enorme individuo que se acerca por la acera no está a punto de aplastarnos la cara.

El correcto funcionamiento de esa red depende de procesos de suma fragilidad. Cuando sobreviene el estrés, incluso los cambios pequeños en el ambiente neuroquímico pueden debilitar al instante las conexiones neuronales. En respuesta al estrés, nuestro cerebro se inunda de sustancias activadoras como la norepinefrina y la dopamina, liberadas por neuronas del tronco encefálico que envían proyecciones a todo el encéfalo. Los niveles elevados de esas moléculas señalizadoras en la corteza prefrontal inhiben la estimulación neuronal, en parte porque debilitan temporalmente los puntos de conexión, o sinapsis, entre neuronas. La actividad neuronal disminuye, a la vez que lo hace la capacidad de controlar la conducta. Tales efectos no hacen más que empeorar cuando las glándulas suprarrenales, a las órdenes del hipotálamo, segregan cortisol, una hormona del estrés que llega al cerebro a través del torrente sanguíneo. En esas circunstancias, el autodominio depende de un equilibrio delicado.

«Mantener la cabeza fría» es una expresión que describe con acierto los procesos biológicos básicos. La maquinaria neuronal de la corteza prefrontal (y su capacidad de movilizar la memoria de trabajo para permanecer centrados en la tarea que tenemos entre manos) impide que la cascada de neurotransmisores generada a niveles profundos del cerebro provoque una corriente emocional de pánico.

Nuestras investigaciones para demostrar la facilidad con la que deja de funcionar la corteza prefrontal empezaron hace unos veinte años. Los estudios con animales realizados por una de nosotras (Arnsten) junto con la fallecida Patricia Goldman-Rakic, de la Universidad de Yale, fueron unos de los primeros en ilustrar el modo en que las alteraciones neuroquímicas asociadas al estrés inhiben la función prefrontal. El trabajo reveló que las neuronas de esa parte del cerebro se desconectaban y dejaban de emitir impulsos eléctricos tras exponerlas a una avalancha de neurotransmisores u hormonas del estrés.

Por contra, ciertas regiones situadas a un nivel profundo del encéfalo toman con fuerza las riendas de nuestra conducta. La dopamina llega a una serie de estructuras, los ganglios basales, que regulan los impulsos y las respuestas emocionales y motoras habituales. Los ganglios basales no solo intervienen cuando andamos en bicicleta sin caernos, sino también cuando nos abandonamos a hábitos adictivos, como los que nos hacen ansiar un helado.

En 2001, Benno Roozendaal, hoy en la Universidad de Groningen, James McGaugh, de la Universidad de California en Irvine, y sus colaboradores hallaron cambios similares en la amígdala, otra región cerebral de origen antiguo. En presencia de norepinefrina y cortisol, la amígdala alerta al resto del sistema nervioso sobre un peligro inminente y también refuerza los recuerdos relacionados con el miedo y otras emociones.

Esas investigaciones se extienden ahora a los humanos. Los estudios han empezado a demostrar que algunas personas parecen más vulnerables que otras debido a su constitución genética o la exposición previa al estrés. En cuanto la dopamina y la norepinefrina desactivan los circuitos de la corteza prefrontal que intervienen en las funciones cognitivas, algunas enzimas degradan los neurotransmisores para que no persista la interrupción. De este modo, podemos volver a la situación normal cuando el estrés amaina. Determinadas formas de un gen debilitan esas enzimas y hacen a las personas más propensas al estrés y, en ciertos casos, a la enfermedad mental. De forma similar, los factores ambientales pueden aumentar esa vulnerabilidad. Por ejemplo, la intoxicación por plomo puede reproducir algunos aspectos de la respuesta al estrés y socavar la función cognitiva.

Otras investigaciones tratan de aclarar lo que sucede cuando la agresión a la corteza prefrontal dura días o semanas. Parece que el estrés crónico expande la compleja red de conexiones entre neuronas en nuestros centros emocionales inferiores, mientras que las zonas que se movilizan durante el razonamiento flexible y sostenido —desde la filosofía de Immanuel Kant hasta el cálculo— empiezan a perder fuerza. Bajo estas condiciones, las dendritas arboriformes que reciben señales en la amígdala aumentan de tamaño y las de la corteza prefrontal se encogen. El equipo de John Morrison, de la Escuela de Medicina Monte Sinaí, ha demostrado que las dendritas prefrontales vuelven a

«CON LA CABEZA FRÍA»
es una expresión que refleja los procesos fisiológicos básicos de autocontrol


DAN SAELINGER

crecer si desaparece el estrés, pero la capacidad de regeneración se desvanece cuando la tensión es intensa. Una de nosotras (Sinha) ha descrito ese fenómeno en humanos, al relacionar la retracción de la materia gris prefrontal con unos antecedentes de exposición al estrés.

Esa cadena de acontecimientos moleculares nos hace más vulnerables a posteriores situaciones difíciles y probablemente contribuye a la depresión, adicción y trastornos por ansiedad, incluido el trastorno por estrés postraumático. El sexo constituye un factor determinante en la reacción ante el estrés. En las mujeres, la hormona estrogénica puede aumentar la sensibilidad. Una de nosotras (Mazure) y sus colaboradores han demostrado que el estrés vital conlleva un mayor riesgo de sufrir depresión en mujeres que en hombres, así como una menor contención de los comportamientos adictivos, como el hábito de fumar. En los hombres, el estrés desempeña un papel más prominente en los impulsos exacerbados y las conductas controladas por los ganglios basales.

Queda todavía por averiguar el modo en que el estrés altera el centro prefrontal del autodominio. Se está investigando el efecto de otras sustancias neuroquímicas en esa región del cerebro. El grupo de Trevor W. Robbins y Angela Roberts, de la Universidad de Cambridge, se pregunta si la serotonina, que ejerce una influencia clave en la depresión, modularía el estrés y la ansiedad a través de su acción en la corteza prefrontal.

Ese tipo de estudios entrañan especial dificultad, dado que los estándares éticos actuales para los experimentos con humanos exigen que se evite la exposición a situaciones de estrés psicológico extremo. De hecho, se advierte a los participantes del estudio de que pueden abandonarlo en cualquier momento. Se les otorga, por tanto, el control sobre la situación experimental, por lo que esta ya no reproduce el estrés de la vida real. Algunos laboratorios han conseguido simular los efectos del estrés incontrolable mediante la proyección de películas perturbadoras o bien, como en el grupo de Sinha, haciendo que los participantes imaginen sus propias experiencias estresantes para poder acceder a sus reacciones.

Una pregunta desconcierta todavía a los científicos: ¿por qué el cerebro dispone de un mecanismo que debilita las funciones cognitivas más elevadas? Todavía no se sabe con seguridad, pero esta reacción primitiva quizá salvara vidas humanas cuando un animal depredador merodeaba entre las ramas. Si de repente atisbamos la luz llameante de un tigre en el bosque, resulta mucho más útil quedarnos paralizados para que el animal no nos vea que recordar las palabras del poema de William Blake.

Al quedar desactivadas las redes del cerebro superior, lentas y reflexivas, las vías encefálicas primitivas nos hacen detener al instante o nos preparan para huir. Esos mecanismos nos sirven igualmente para enfrentarnos con el peligro en el mundo de hoy, como cuando un conductor imprudente nos corta el paso y debemos pisar el freno a fondo. Pero si permanecemos mucho tiempo en ese estado, la función prefrontal se debilita, una desventaja abrumadora en circunstancias en las que necesitamos tomar decisiones complejas, como en la enfermedad grave de un ser querido o la organización de un proyecto importante con un plazo de entrega apretado.

MANTENER LA COMPOSTURA

Una respuesta lógica a nuestra creciente comprensión del nerviosismo es concebir estrategias para mantener inalterado nuestro centro de autodominio. Existe la esperanza de que el conocimiento de las reacciones moleculares responsables de que el cerebro pase de un estado «reflexivo» a un estado «reflejo» permita mejorar el tratamiento de los trastornos relacionados con el estrés. Algunos de los avances confirman lo que ya sabemos. Entrenarse para emergencias o para el servicio militar consiste en enseñar a los ganglios basales y otras estructuras encefálicas a que aprendan las reacciones automáticas necesarias para sobrevivir. Los estudios con animales indican que el sentido de control psicológico que ostentan con naturalidad un soldado o un auxiliar de urgencias médicas constituye el factor que determina si nos desmoronamos durante el estrés. Hablar en público llena de júbilo a quien se siente seguro ante una audiencia. A otros, no les produce más que terror y su mente se queda en blanco.

Las rutinas del sargento instructor se reflejan en estudios con animales, en los que se demuestra su mayor capacidad para manejar el estrés cuando han superado múltiples situaciones de tensión leve durante la juventud. De forma parecida, los estudios con humanos indican que afrontar con éxito las dificultades les hace más resilientes. Por el contrario, si durante la infancia uno sale mal parado de esas experiencias, al hacerse mayor puede volverse más sensible y sentirse limitado por el nerviosismo y la depresión.

En el laboratorio empiezan a obtenerse datos sobre futuros tratamientos. La prazosina, un fármaco para la hipertensión arterial que bloquea algunas de las acciones perjudiciales de la norepinefrina, se encuentra en fase de ensayo en veteranos y civiles que sufren trastorno por estrés postraumático. La prazosina también parece disminuir las ansias por el alcohol y la cantidad consumida de este. Un estudio reciente realizado por el equipo de Sherry McKee, de la Universidad de Yale, ha hallado que otro medicamento antihipertensivo, la guanfacina, inhibe algunas reacciones al estrés y fortalece las redes corticales prefrontales, con lo que ayuda a las personas a abstenerse de fumar en situaciones de tensión. (Arnsten y la Universidad de Yale reciben regalías de la compañía farmacéutica Shire para la comercialización de la guanfacina como fármaco de liberación prolongada en el tratamiento del trastorno por déficit de atención con hiperactividad en niños y adolescentes, pero no las reciben para la forma de liberación inmediata del fármaco administrado a adultos en este estudio.) Además, varios laboratorios han mostrado que las estrategias conductuales como la relajación, la respiración profunda y la meditación disminuyen la respuesta al estrés.

¿Y qué hacer para recuperar el autodominio? Tal vez aprender el modo en que el cerebro reacciona al estrés le permita a uno obtener una mayor sensación de control. Quizás entonces, la próxima vez que nos encontremos ante un examen o hablando en público y nuestra mente se quede en blanco, nos podemos repetir: «esto es solo mi cerebro que trata de salvarme de un tigre». Aunque no nos ofrezca la respuesta correcta o la palabra que buscamos, tal vez ese pensamiento nos provoque una sonrisa reconfortante.

PARA SABER MÁS

Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. Amy F. T. Arnsten en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 10, págs. 410-422, junio de 2009.

Can't remember what I forgot: Your memory, your mind, your future. Sue Halpern. Three Rivers Press, 2009.

Prefrontal cortical network connections: Key site of vulnerability in stress and schizophrenia. Amy F. T. Arnsten en *International Journal of Developmental Neuroscience*, vol. 29, n.º 3, págs. 215-223, 2011.



Jesús Ramos Martín es profesor del departamento de economía e historia económica de la Universidad Autónoma de Barcelona e investigador del grupo de Metabolismo de las sociedades del Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales del mismo centro.

SOSTENIBILIDAD

Economía biofísica

El flujo metabólico y otros conceptos procedentes de la ecología y la termodinámica ayudan a valorar si un sistema económico es o no viable

Jesús Ramos Martín

La crisis económica actual está poniendo de manifiesto las dificultades que tiene la ciencia económica para explicar procesos para los que en teoría debería ofrecer respuestas, como el desempleo crónico, la inflación o el crecimiento económico. Tanto los análisis que venimos observando últimamente, como las medidas de política económica que se recomiendan, parecen fallar de forma sistemática, para asombro no solo del público general, sino también de los propios economistas, que ven cómo las recetas que aprendieron en las facultades no funcionan.

El problema fundamental radica en que la ciencia económica predominante ha perdido el contacto con la base material del proceso económico; se ha centrado, casi de forma exclusiva, en analizar el funcionamiento de los mercados y el intercambio comercial. Esta visión se muestra incapaz de explicar el origen de algunos de nuestros problemas más graves y de ofrecer alternativas en términos de políticas públicas. Pone énfasis en el aumento de la producción económica (crecimiento) sin considerar la finalidad ni los costes del mismo. Olvida, pues, que el objeto del proceso económico no debe ser el aumento de la producción *per se*, sino la mejora en el disfrute de la vida. El fin de una economía corresponde a la reproducción de la sociedad, de los seres humanos, de su cultura y de sus instituciones; para ello se necesita una serie de bienes y servicios, que se producen mediante la aplicación de trabajo humano y conocimiento a unos recursos naturales.

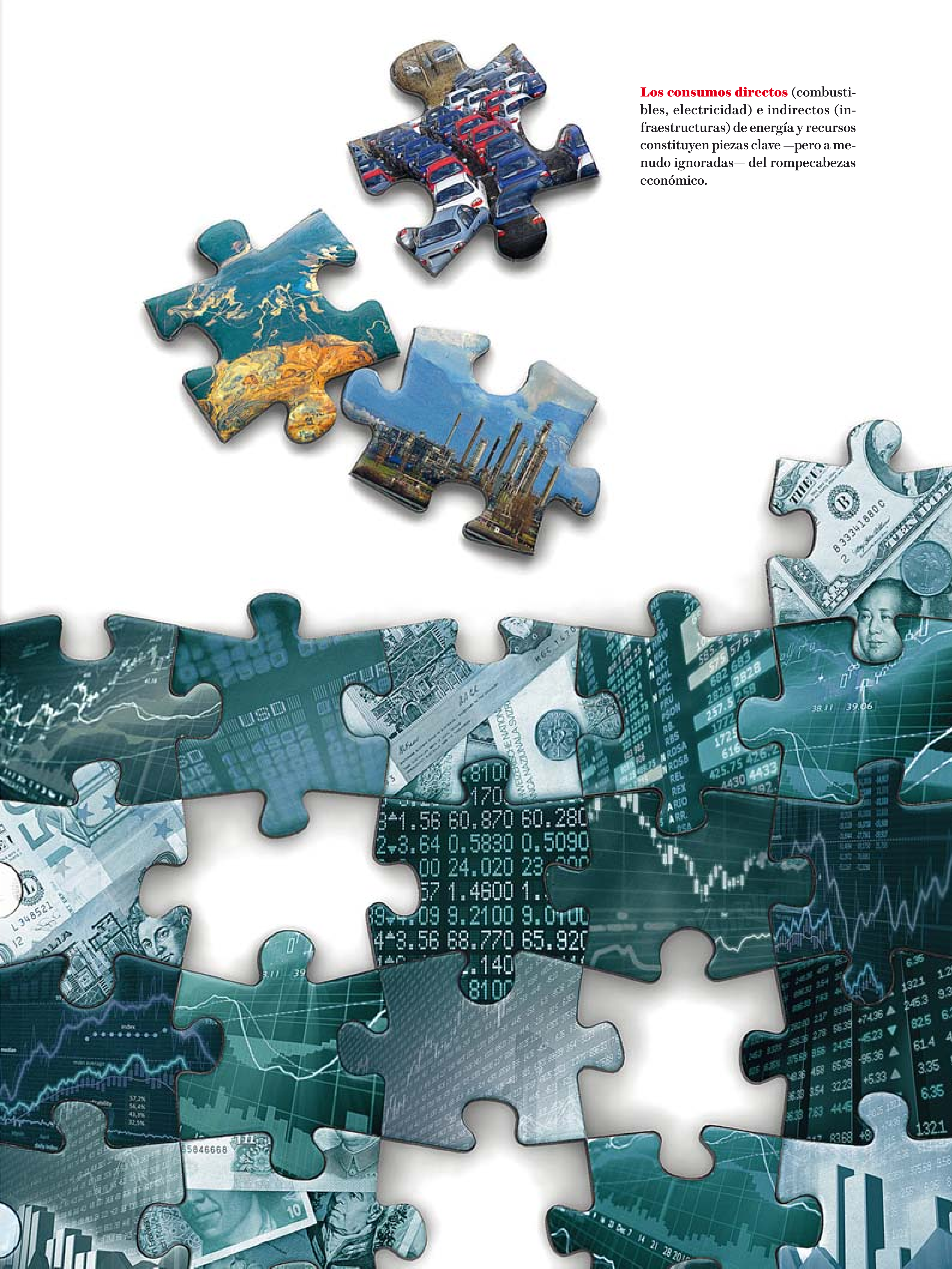
La economía predominante ha dejado de lado el análisis de elementos tan importantes como el tiempo (duración) y la escala (tamaño) de las economías, así como el funcionamiento de las mismas mediante la transformación de energía y recursos materiales. Ha ignorado, pues, el análisis de los flujos metabólicos, o metabolismo, de las sociedades. Algunas cuestiones clave no respondidas por esta visión económica centrada en los mercados son la función de los recursos naturales (y, en par-

EN SÍNTESIS

Centrada solo en los mercados y el intercambio comercial, la economía imperante vive a espaldas de los límites que imponen los recursos del planeta.

Esta pérdida de contacto con la base material del proceso económico impide explicar el origen de algunos de nuestros problemas más graves y plantear alternativas viables.

Mediante conceptos procedentes de la ecología y la termodinámica, la economía biofísica ofrece una visión más completa del proceso económico y arroja luz sobre la crisis actual.



Los consumos directos (combustibles, electricidad) e indirectos (infraestructuras) de energía y recursos constituyen piezas clave —pero a menudo ignoradas— del rompecabezas económico.

ECONOMÍA MATEMÁTICA

La visión marginalista

A mediados del s. XIX apareció en Europa una corriente que cambiaría el rumbo de la teoría económica. Nos referimos a la visión marginalista (o también denominada neoclásica). Según esta, el valor de los bienes se explica a partir de la psicología de los consumidores. Su ley fundamental, el «principio de la utilidad marginal decreciente», nos dice que la satisfacción lograda mediante el consumo de un bien aumenta con el incremento del consumo, pero lo hace a un ritmo menguante; es decir, que la utilidad que atribuimos a la última unidad consumida (utilidad marginal) será inferior a la de la penúltima. (Por mucho que nos gusten los helados, el placer que obtendremos al consumir un helado adicional será cada vez menor, porque nos iremos saciando.)

En ese escenario, un individuo consumirá unidades de un producto mientras la utilidad marginal, la satisfacción que le proporciona la última unidad consumida, sea superior al precio que paga por ella. Por otro lado, un empresario producirá unidades mientras el precio que recibe por ellas sea superior al coste marginal, el de producir la última unidad. El equilibrio del mercado se logrará cuando el precio del producto sea igual a la utilidad marginal y al coste marginal.

El giro conceptual que conllevó esa corriente hizo que el análisis económico se centrara en la optimización matemática, el intercambio de bienes y las situaciones de equilibrio —extrañas en el mundo real—. Estas premisas dominan todavía el pensamiento actual. Pensemos en los análisis de la evolución del precio del petróleo que aparecen a menudo en la prensa: obvian las variables biofísicas (disminución de las reservas, mayor coste energético de la extracción) y geopolíticas (acuerdos bilaterales entre países), y asumen que existe un mercado mundial de petróleo con precios únicos. Nada más lejos de la realidad.

ticular, la energía), la imposibilidad de mantener un crecimiento infinito o la paradoja del aumento en la eficiencia en el uso de los recursos.

Presentamos aquí un enfoque teórico alternativo, perteneciente al ámbito de la economía heterodoxa, que sí arroja luz sobre todas esas cuestiones. Nos referimos a la economía biofísica, que centra la atención en los procesos de producción de bienes y servicios (qué se produce, cómo se produce, para qué se produce y quién lo consume) y en los procesos de distribución de la renta (y, por tanto, del consumo de bienes materiales).

RETROSPECTIVA

Según su fundador Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994), la economía biofísica (o economía ecológica, como también se denomina hoy) tiene como objeto analizar la relación entre el proceso económico y el medio. El proceso económico transforma recursos naturales en bienes y servicios para nuestro consumo, mediante la aplicación de mano de obra, conocimiento y maquinaria (capital). El análisis conjunto de este proceso y su repercusión sobre el medio permite estudiar la viabilidad de una tendencia determinada.

Ese enfoque biofísico hunde sus raíces en los trabajos pioneros de ciertos economistas y no economistas. Thomas Malthus (1766-1834) fue el primero en resaltar la aparente contradicción entre una población creciente y unos recursos naturales escasos, poniendo como ejemplo la tierra cultivable. Siguió este análisis William Stanley Jevons (1835-1882): en su clásico ensayo sobre la cuestión del carbón, de 1865, advirtió que las mejoras de la eficiencia en el uso de los recursos no eran suficientes para evitar el agotamiento de los recursos no renovables. La introducción del concepto de estado estacionario por parte de John Stuart Mill (1806-1873) significó un reconocimiento de los límites que la naturaleza imponía al desarrollo económico. Posteriormente, ello ha sido analizado por economistas ecológicos como Herman Daly, de la Universidad de Maryland, quien en 1990 propuso la distinción entre crecimiento (incremento cuantitativo en una escala física) y desarrollo (mejora cualitativa o realización de potencialidades).

Ese interés en las raíces biofísicas de la producción se perdió con el giro marginalista que protagonizó la economía en el siglo XIX [*véase el recuadro* «La visión marginalista»]. Los estudios pasaron a centrarse en el funcionamiento de los mercados y en la búsqueda del equilibrio en los mismos.

Ese enfoque que trivializaba los recursos naturales se vio reforzado tras las crisis del petróleo de los años 1973 y 1979. Las economías desarrolladas reaccionaron mediante la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos, lo que amortiguó el aumento de precios de la energía. Sin embargo, eso no es aplicable a la situación actual. En las crisis de los años setenta, la caída de la demanda de energía provocada por el aumento de los precios del petróleo redujo los precios a medio plazo. Hoy, en cambio, la caída de la demanda de los países desarrollados se ha visto compensada por el aumento en el consumo de energía de los llamados países emergentes, con China a la cabeza.

LA CUESTIÓN DEL TIEMPO

Adoptar un enfoque biofísico del proceso económico equivale a aceptar que la economía está sujeta a las leyes de la termodinámica y que su funcionamiento solo puede garantizarse por una entrada continua de energía y materiales.

La primera ley de la termodinámica, o principio de conservación, nos dice que la energía no puede ser creada ni destruida, sino que se conserva. Nos enseña, por tanto, que todos los elementos (*inputs*) usados en un proceso productivo se convertirán, a la postre, en una mezcla de productos finales y residuos. Ello reviste importancia porque destierra algunos mitos de la política ambiental como las virtudes de la incineración de residuos —no los hace desaparecer, solo los transforma.

La segunda ley, o principio de la entropía, constituye sin duda la pieza de la teoría termodinámica que más ha influido en el pensamiento económico. Esta nos dice que la entropía (una medida de la energía no disponible) de un sistema aislado tiende a un valor máximo. ¿Cuáles son sus implicaciones económicas? En primer lugar, este principio excluye la reversibilidad de un gran número de procesos. Así lo formulaba Rudolf Clausius en el siglo XIX: «El calor no puede nunca, por sí solo, ir de un cuerpo con baja temperatura hacia otro con alta temperatura». Ello significa que cualquier proceso natural resultará en un aumento de la entropía. Este resultado hizo que el astrónomo Arthur Eddington hablase, ya en el siglo XX, de la «flecha del tiempo», según la cual el aumento de la entropía determina la dirección del tiempo en el sentido evolutivo. Los procesos irían en una dirección temporal irreversible: del pasado al futuro, pasando por el presente.

A partir de esas ideas, Georgescu-Roegen presentó en 1971 su clásica distinción entre T y t, donde «*T* representa el Tiempo, concebido como una corriente de la conciencia, o si se quiere, como una sucesión continua de “momentos”, y *t* representa

la medida de un intervalo (*T'*, *T''*) por un reloj mecánico». Es decir, el *Tiempo* como sucesión continua de momentos sería equivalente a la evolución, que no se detiene y que tiene una dirección concreta. El *tiempo*, en cambio, correspondería a un intervalo entre dos momentos de ese continuo evolutivo; es precisamente el que usamos al medir, por ejemplo, la producción de un país en un año (PIB).

La economía predominante elabora sus teorías y modelos a partir de un tiempo equivalente al que mide el reloj de Georgescu-Roegen, ese intervalo *t* donde la reversibilidad de los procesos es posible. Pensemos en los modelos que suelen emplearse para estimar el crecimiento económico o evaluar medidas políticas (una subida de impuestos, por ejemplo). Estos consideran que siempre puede darse «marcha atrás» (bajar los impuestos) para anular el efecto del mismo. Suponen que es posible revertir la situación sin provocar nuevas consecuencias. Ello, sin embargo, es poco realista. Por lo general, la adopción de cualquier medida económica conlleva efectos permanentes (una subida de impuestos puede provocar una reducción en el consumo, que no volverá a aumentar aunque las tasas bajen de nuevo).

Lo mismo sucede en cuanto a la vida y evolución de las especies y sociedades humanas, donde abundan los ejemplos de procesos irreversibles, como las extinciones de especies o el agotamiento de recursos naturales. Así lo muestran los trabajos de Jared M. Diamond, de la Universidad de California en Los Ángeles, y Joseph A. Tainter, de la Universidad estatal de Utah. Quizá se vea más claro en el ámbito tecnológico, donde la apuesta por una determinada técnica impide el cambio de la misma durante un número de años, por una simple cuestión económica. Una vez hecha la inversión, hay que amortizarla. (La adopción en su día de la tecnología termonuclear para la generación eléctrica implica que por un período de al menos cuarenta años esas centrales no podrán ser sustituidas, a pesar de que existan en el mercado opciones más eficientes, seguras o con menor impacto ambiental.)

Por tanto, desde la economía biofísica se considera que, en la generación de políticas, deben tenerse en cuenta los efectos permanentes asociados a ciertas decisiones (debidos a la irreversibilidad de los procesos) y proceder con cautela a la hora de aplicar medidas concretas. No podemos ignorar que los sistemas económicos se hallan en continua evolución.

ESCALA O TAMAÑO DE LA ECONOMÍA

Otra implicación de la ley de la entropía guarda relación con la eficiencia. Según la paradoja de Jevons (también denominada efecto rebote), las mejoras de la eficiencia en el uso de los recursos pueden conllevar un aumento en el consumo, en términos absolutos, de dichos recursos. Por ejemplo, el aumento en la eficiencia energética de los automóviles no se traduce en una disminución del consumo de gasolina y, por tanto, de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino en un aumento de la distancia media recorrida. Lo mismo se observa en las infraestructuras de transporte, donde las circunvalaciones de las ciudades no reducen el tráfico, sino que lo aumentan, por lo que resultan necesarias sucesivas ampliaciones. En 2010, mientras realizaba el doctorado en economía aplicada en la Universidad Autónoma de Barcelona, Jaume Freire demostró, en un artículo publicado en *Energy Policy*, que la introducción de medidas de eficiencia

EFICIENCIA Y CONSUMO

La paradoja de Jevons

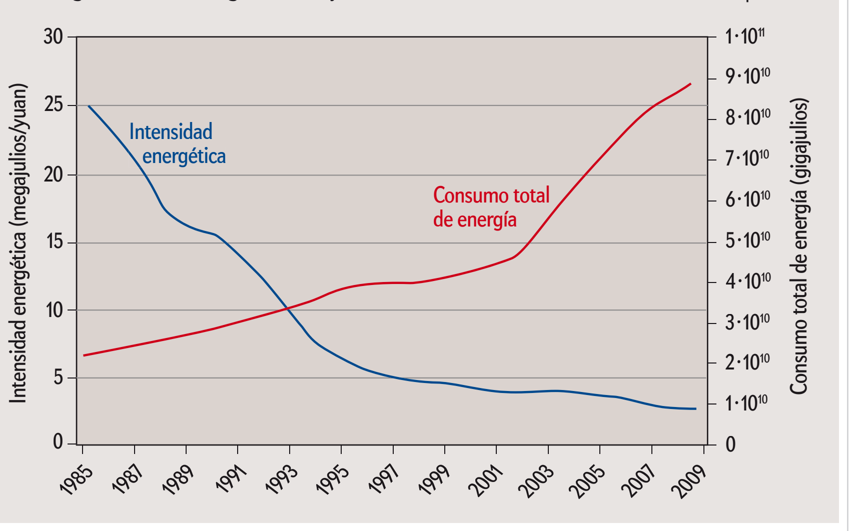
La introducción de la novedosa máquina de vapor de James Watt, más eficiente que un modelo anterior, redujo el consumo de carbón de ese ingenio. En principio, una buena noticia. Sin embargo, al ser esa máquina más rentable, rápidamente se implantó en sectores industriales que antes no la usaban. A la larga, el invento de Watt condujo a un aumento notable del consumo de carbón. Este efecto en apariencia contradictorio lo advirtió William Stanley Jevons (1835-1882) en su clásico ensayo sobre el carbón *The coal question* (1865). De ahí que reciba el nombre de paradoja de Jevons.

Según esta paradoja, también denominada efecto rebote, una mejora en la eficiencia de uso de un recurso no conlleva una disminución del uso total del mismo, sino un aumento de las actividades que lo consumen. Al aumentar la eficiencia en el uso se produce una caída del precio (o del coste) que induce un aumento en la demanda.

Un ejemplo clásico corresponde al aumento de la distancia recorrida por los coches conforme disminuye su consumo de gasolina por kilómetro. Otro, al aumento de la capacidad de algunos electrodomésticos (refrigeradores) a medida que aumenta su rendimiento energético.

A mayor escala tenemos el caso de China, que entre los años 1985 y 2009 bajó su intensidad energética (cantidad de energía necesaria para producir una unidad de PIB) o, lo que es lo mismo, mejoró su eficiencia energética. Sin embargo, esta mejora fue acompañada de un aumento en el consumo total de energía (*gráfica*).

El resultado global es un aumento en el consumo total del recurso, a pesar de que se haga de manera más eficiente. Ello debería tenerse en cuenta en el diseño de políticas de eficiencia energética y de otros recursos, pues los beneficios potenciales de tales medidas nunca se realizan al cien por cien.



FUENTE: INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DE CHINA

¿En qué gastamos el tiempo y la energía?

El conjunto de reacciones y procesos bioquímicos que permiten que un organismo mantenga sus funciones y estructuras corresponde al metabolismo endosomático. Cuando aplicamos este concepto biológico a las transformaciones de energía y materiales necesarias para la existencia y mantenimiento de una sociedad, hablamos de metabolismo exosomático (que tiene lugar fuera del cuerpo). Este enfoque biofísico arroja nueva luz sobre los procesos económicos, puesto que permite comprender la estrecha relación de estos con los sistemas naturales. Para analizar el metabolismo de una sociedad se define primero la estructura de agentes y actividades que la mantienen. En 2005 estudiamos en nuestro grupo de investigación el caso de Cataluña. Distinguimos entre dos grandes tipos de actividades: las no remuneradas y las remuneradas. Las primeras, relacionadas con el hogar, incluyen la actividad de la población no activa (niños, jubilados y desempleados), más el ocio de los activos. Las segundas engloban los sectores de energía y minas, industria y construcción, y servicios y administraciones públicas. Se mide luego el tiempo de actividad humana asociada a cada sector (AH, *rojo*) y el consumo de energía correspondiente (CE, *azul*). Mediante la combinación de las dos variables, se obtiene para cada sector la tasa de metabolismo (TM, *verde*), que indica el consumo de energía (en megajulios, MJ) durante una hora de actividad. Según los resultados del estudio, el 90 % del tiempo disponible en la sociedad catalana se dedica a actividades no remuneradas. Con solo el 0,1 % del tiempo, el sector de energía y minas pone a disposición del resto de sectores toda la energía que gastarán, para lo cual consume el 11 % de la energía primaria; ello entraña una tasa metabólica altísima, de 2000 MJ/h. Cada sector presenta un comportamiento distinto.

ACTIVIDADES NO REMUNERADAS
AH = 7970 h (90 %)
CE = 23 GJ (14 %)
HOGAR
TM = 10,8 MJ/h
AH = 530 h (6 %)
ACTIVIDADES REMUNERADAS
HA = 340 h (3,9 %)
CE = 83 GJ (51 %)
AH = 9 h (0,1 %)
CE = 18 GJ (11 %)
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN
TM = 244 MJ/h
ENERGÍA Y MINAS
TM = 2000 MJ/h
CE = 39 GJ (24 %)
SERVICIOS PÚBLICOS
TM = 75 MJ/h

Este tipo de análisis biofísicos sirven para que, una vez la sociedad haya determinado qué actividades considera imprescindibles, pueda establecerse una jerarquía de usos energéticos que permita afrontar situaciones de escasez creciente de la energía, ya sea por la oferta, por su elevado coste, o por ambos. Asimismo, a la hora de planificar un cambio en el modelo económico (mediante un aumento del peso de la industria, por ejemplo), el enfoque metabólico muestra cuál va a ser su impacto en términos de consumo total de energía del país y qué sectores pueden verse afectados en el caso de que se requiera un reajuste interno del consumo energético. Por fin, el cálculo de las tasas de metabolismo exosomático de los diferentes sectores permite establecer comparaciones con otras economías similares para analizar la viabilidad de nuestros modelos de desarrollo.

En promedio, a lo largo de un año cada ciudadano dispone de 8760 horas y consume 162 GJ, lo que representa un metabolismo exosomático de 18,5 MJ/h.

FUENTE: «CATALONIAS'S ENERGY METABOLISM: USING THE MuSIASEM APPROACH AT DIFFERENT SCALES», POR J. RAMOS MARTÍN, S. CANELLAS-BOLTÁ, M. GIAMPIETRO Y G. GAMBOA EN *ENERGY POLICY*, VOL. 37, PÁGS. 4658-4671, 2009

energética en los hogares de Cataluña tenía un efecto rebote del 49 por ciento a largo plazo. Es decir, que gran parte del potencial ahorrador de las medidas no se materializaba (el 49 por ciento de la energía ahorrada volvía a consumirse por otra vía).

Esas ideas son perfectamente compatibles con el análisis que presentó Alfred Lotka en 1922 acerca de la selección natural en el caso de los sistemas naturales. Según Lotka, la selección natural tiende, por un lado, a incrementar el flujo de energía que circula a través de los sistemas biológicos y, por otro, a aumentar la eficiencia energética de los procesos biológicos. Si aplicamos esta visión a las economías modernas, veremos que estas aumentan cada vez más su consumo de energía y materiales, a pesar de que al propio tiempo aumentan la eficiencia en el uso de los mismos. Esto es exactamente lo que demostró en 2005 Óscar Carpintero, de la Universidad de Valladolid, para el caso del consumo de materiales en España, y lo que EUROSTAT y la Agencia Internacional de la Energía nos dicen que ocurre en la gran mayoría de los países.

La economía biofísica reclama la importancia de considerar la escala o el tamaño de las economías. Para ello analiza el

consumo material de recursos naturales, los niveles de vida y la evolución de la población (tamaño y estructura), elementos que han sido olvidados durante largo tiempo por los economistas, incluso en los actuales momentos de fuerte crisis económica.

EL METABOLISMO

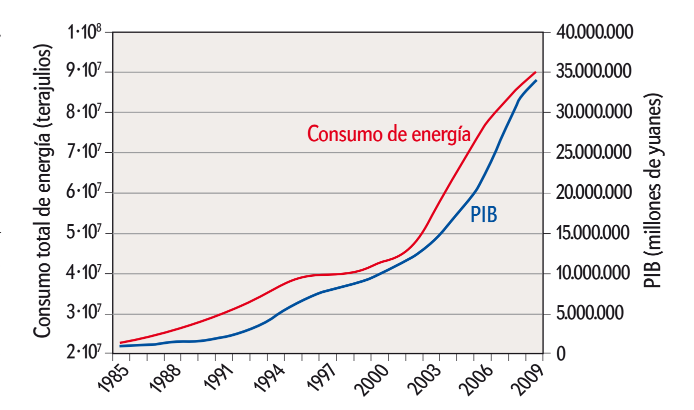
Si aceptamos la importancia de compatibilizar el tamaño y composición de nuestras economías con los recursos naturales del planeta, es preciso entender el modo en que utilizamos estos recursos (energía y materiales). Para ello resulta de gran utilidad aplicar a las sociedades el concepto biológico de metabolismo.

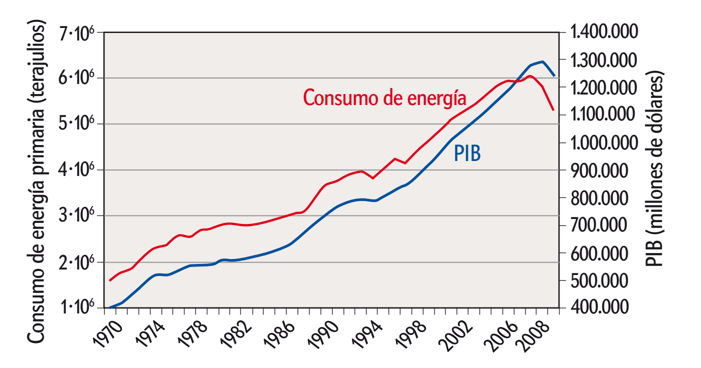
El metabolismo de una sociedad humana se corresponde con las transformaciones de energía y materiales necesarias para la existencia y el mantenimiento de la misma. La idea fue introducida por Georgescu-Roegen bajo el nombre de *flujo metabólico*. En su opinión, el proceso económico (producción y distribución de bienes y servicios) tenía un lado biofísico que debía ser analizado pero que solía obviarse debido a la fijación de los economistas por el análisis de los mercados y el intercambio comercial. A partir del trabajo de Lotka, Georgescu-Roegen introdujo los conceptos de metabolismo endosomático y metabolismo exosomático para diferenciar las transformaciones de energía y materiales que tenían lugar dentro del cuerpo humano de las que ocurrían fuera del mismo. Así, el metabolismo endosomático estaría relacionado con la alimentación y el exosomático con el resto de la energía consumida en nuestras actividades diarias, como la electricidad o el combustible de los automóviles.

Aplicar la metáfora metabólica permite enfatizar que el proceso económico depende de la existencia, en el medio, de los recursos naturales necesarios para producir y consumir. O, en otras palabras, que los sistemas sociales dependen de los sistemas naturales para su supervivencia.

El metabolismo de una economía se compone del flujo metabólico de los agentes implicados (sectores económicos, hogares, etcétera), cada uno de los cuales realiza una función necesaria para el mantenimiento de todo el sistema. Mantener esta estructura de agentes y funciones requiere el consumo de recursos naturales. Nuestras sociedades modernas proveen a los ciudadanos de educación, sanidad, seguridad y otros servicios. La realización de estas funciones no solo conlleva el consumo directo de recursos (la calefacción de las aulas), sino que arrastra todo un uso de energía y materiales que han sido necesarios previamente (formación del profesorado, fabricación del material escolar, construcción de los edificios). Por tanto, a cada actividad le corresponde un perfil metabólico. Una hora de educación tiene un consumo de recursos diferente al de una hora de atención sanitaria en un hospital o una hora de servicio de seguridad aportada por un policía. Ello explica que las sociedades menos desarrolladas, y con menos funciones, presenten niveles de consumo inferiores.

A la hora de evaluar de manera cuantitativa la viabilidad y deseabilidad de un modelo de desarrollo concreto, en realidad estamos estudiando el perfil metabólico del sistema. Para ello, primero debemos caracterizar su estructura, funciones y compartimentos. Esto lo hacemos mediante el análisis de los flujos de materiales y energía necesarios para mantener las estructuras ya existentes y crear otras nuevas, y para garantizar algunas funciones básicas. De esta manera podemos determinar el coste de cierta función (producción de alimentos, atención sanitaria, educación, seguridad) en términos de energía y materiales: su *perfil metabólico*. Además, cada una de estas actividades precisa vectores energéticos diferentes. El policía del ejemplo anterior usará gasolina en su hora de trabajo, mientras que el médico o el profesor emplearán gas natural para la calefacción y electricidad para el resto de las tareas. Por tanto, cada actividad requiere una determinada fuente primaria de energía.





El crecimiento económico guarda una estrecha relación con el aumento del consumo energético. En China (*arriba*), donde se ha trasladado gran parte de la producción mundial, se observa que el producto interior bruto (PIB) ha crecido junto con el consumo total de energía. En España (*abajo*), la relación entre actividad económica y gasto energético es todavía más clara.

FUENTES: INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DE CHINA (*gasto energético y PIB chinos*); AGENCIA INTERNACIONAL PARA LA ENERGÍA (*gasto energético español*); ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO (*PIB español*)

Ese análisis permite establecer prioridades en el uso de los recursos naturales. En un contexto de escasez creciente y de aumento de costes de la energía, será más razonable concentrar el uso de los recursos en aquellas actividades más directamente relacionadas con el mantenimiento de las sociedades (agricultura, minería, industria y servicios básicos) y reducirlo en las actividades más suntuarias (viajes de ocio, entre otros).

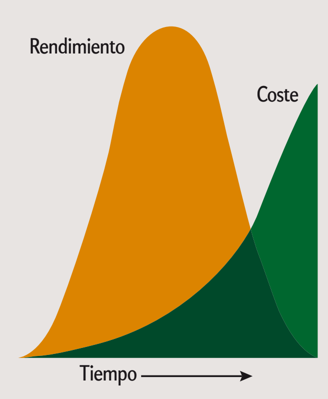
Una vez determinadas las funciones básicas que definen nuestra sociedad —o nuestro objetivo de sociedad— y analizado su perfil metabólico, podemos comprobar si ese consumo de energía y materiales entra en contradicción o no con la disponibilidad de recursos que se hallan en el medio y con el mantenimiento de los sistemas naturales y sus respectivas funciones, que también requieren el consumo de energía y materiales. Es decir, el análisis cuantitativo de la sostenibilidad de un modelo de desarrollo debe estudiar la compatibilidad entre el metabolismo exosomático de las sociedades y el metabolismo de los ecosistemas.

ENERGÍA NETA

El retorno de la inversión energética

Aunque el rendimiento de un pozo de petróleo sigue una forma de campana, su coste de extracción aumenta con el tiempo. Este balance entre coste y beneficio se refleja en la tasa de retorno energético: la razón entre la cantidad de energía aprovechable que se extrae y la energía que se requiere para extraerla. Cuanto mayor es esa razón, de mayor calidad es la fuente energética. Dado que la importación de petróleo tiene una tasa de retorno mayor que la extracción, los países industrializados prefieren importar la energía de otros lugares.

Las reservas de petróleo suelen darse en sus valores brutos. Pero lo que nos interesa conocer es la cantidad de energía neta que llega a la sociedad. En EE.UU., la tasa de retorno de la extracción ha pasado de 1229,48 en 1919 a 5,02 en 2007. Cada vez se requiere más energía para obtener un barril de petróleo. Ello significa que cada vez vamos a necesitar más energía primaria para poner a disposición de la sociedad una determinada cantidad de energía neta.



EL CRECIMIENTO ECONÓMICO

Una perspectiva biofísica que considere los tres conceptos presentados (el tiempo como duración, el tamaño de la economía y el metabolismo exosomático de las sociedades) permite analizar el crecimiento económico y entender no solo sus limitaciones en cuanto a los *inputs*, sino también sus impactos.

La actual crisis económica se manifiesta en la mayoría de los países ricos en forma de caída del producto interior bruto (PIB), una medida de la actividad económica. En España, ello se traduce en una fuerte destrucción del empleo. Esta situación ha desembocado en que prácticamente desde todos los ámbitos se defienda el crecimiento económico como única manera de paliar la situación. La idea de fondo es que el crecimiento provoca un «goteo» que beneficia a todos los estratos de la sociedad, lo que evita tener que pensar en políticas de redistribución de la renta. Este discurso se basa en el supuesto de que el crecimiento económico es posible y en la creencia de que puede ser indefinido.

Sin embargo, debemos tener en cuenta que la evolución de los sistemas, incluidos los económicos, va íntimamente ligada al consumo de energía y recursos. Numerosos análisis, como los de David I. Stern, de la Universidad Nacional de Australia, muestran una estrecha correlación entre el crecimiento económico y el consumo de energía primaria. En el pasado, cuando la disponibilidad de energía ha dependido de los recursos renovables y se ha usado básicamente biomasa, el crecimiento de las economías (y de su población) ha sido más bien escaso. Así lo mostraba E. A. Wrigley en su libro de 1988 *Continuity, chance and change*. En las economías modernas, más del 80 por ciento de la energía primaria corresponde a los combustibles fósiles y las sociedades dependen de ese flujo continuo de energía, que hasta hace poco era muy barata.

Las sociedades actuales requieren para su funcionamiento un consumo determinado de energía y materiales. La estructura de las mismas depende, por tanto, de la disponibilidad energética. Ello significa que no se puede pretender reducir el consumo de energía de forma brusca, sin esperar cambios estructurales igualmente drásticos (en sanidad, educación, sistema judicial, seguridad, etcétera). También quiere decir que si el objetivo de la política económica es mantener el sistema y hacerlo crecer en el tiempo, deberá garantizarse un flujo cada vez mayor de energía, con las posibles consecuencias ambientales que ello pueda entrañar.

Esa estrategia no ha supuesto problemas graves hasta hoy, porque la energía fósil era abundante y, por ende, barata. Pero era abundante porque su consumo se centraba en las economías occidentales. En la actualidad, sin embargo, se ha trasladado gran parte de la producción a los países emergentes (sobre todo China), lo que ha conllevado aumentos notables del consumo energético en aquellos países. La industrialización requiere maquinaria y conocimientos, y estos a su vez consumen energía y otros recursos. Ello significa que la demanda de energía a nivel mundial no deja de crecer (en línea con el crecimiento del PIB), justo cuando se está manifestando un fenómeno bien conocido en el marco de los recursos no renovables, el cenit del petróleo, introducido en 1956 por Marion King Hubbert, geólogo y ex director de exploraciones de la petrolera Shell [*véase* «Fin de la era del petróleo barato», por Collin J. Campbell y Jean H. Laherrère; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1998 y «Los límites del crecimiento tras el cenit del petróleo», por Charles A. S. Hall y John W. Day, Jr.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2009].

Si la demanda de energía sigue aumentando y la disponibilidad de recursos disminuye, la consecuencia lógica es que los precios del petróleo y el resto de los combustibles fósiles continúen la senda alcista que muestran desde el período 2004-2005. Este fuerte incremento de precios no es la causa —pero no debe desligarse— de la actual crisis económica, de origen financiero. En España, las importaciones netas de combustibles fósiles suponen dos tercios del déficit de la balanza por cuenta corriente (un parámetro que mide las necesidades de financiación del país). Si existe un déficit, debemos financiarnos en el exterior para poder mantener nuestra actividad económica y nivel de vida. Por tanto, el déficit se debe en su mayoría a nuestra dependencia energética del exterior. Si esto es así, y los precios del petróleo van a seguir subiendo, la factura energética del país no dejará de crecer, y con ella nuestra necesidad de financiación, como bien muestran los estudios de José Manuel Naredo, de la Universidad Complutense de Madrid.

Así pues, el escenario futuro muy probablemente exigirá la reducción del consumo energético a niveles que sea posible financiar, lo que conllevará una caída del PIB. Es decir, la reducción y el encarecimiento de la disponibilidad energética provocarán cambios en la estructura de las sociedades. No podrán mantenerse todas las funciones que hoy en día se llevan a cabo, por lo que deberán aplicarse políticas de priorización en el uso de los recursos (sobre todo la energía) que tengan en cuenta todos los miembros de la sociedad.

¿SOLUCIONES?

Lo planteado hasta aquí no es nuevo en el mundo académico, al menos dentro de la economía biofísica. El problema estriba en que el discurso dominante en las universidades y los ámbi-

tos de decisión es otro, centrado en el análisis de los mercados y con el equilibrio de los mismos en mente. Por eso algunas de las soluciones que se proponen no lo son.

Se dice, por ejemplo, que la pérdida de tejido industrial no constituye un problema, pues las economías modernas tienden hacia el desarrollo de los servicios. Sin embargo, este argumento adolece de un fallo grave: supone que los servicios son inmateriales o que, al menos, consumen menos recursos. En primera instancia, ello es cierto. Los servicios entrañan un menor consumo directo de recursos que la industria (el ordenador con el que he escrito este artículo gasta menos energía que la maquinaria que utiliza un empleado en una fundición). Pero también es verdad que la existencia de muchos de esos servicios solo es posible porque la sociedad ha llegado a un grado de complejidad tal que necesita que actividades que antes se asumían en el entorno familiar se encuentren ahora en el mercado. Es decir, es el grado de desarrollo —con el consumo de energía que ello implica— el que hace que surjan «nuevas oportunidades de empleo» (por ejemplo, en el ámbito de los cuidados personales). Pero además, la provisión de esos servicios requiere una formación que solo ha sido posible mediante el consumo de recursos a lo largo de la vida de quienes nos proveen de los mismos. El resultado es que, si bien los servicios consumen menos recursos, solo son posibles si la sociedad tiene ya un determinado tamaño que le ha permitido invertir en ellos. Por tanto, en un escenario futuro con menos recursos energéticos, deberán rediseñarse los tipos de servicios que la sociedad podrá ofrecer a los ciudadanos.

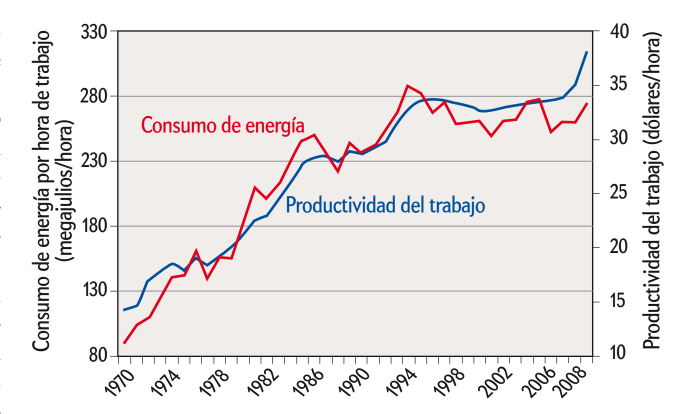
Otra de las soluciones que se plantean se basa en aumentar la productividad del trabajo (el valor, medido en euros, que producimos en una hora de trabajo); en teoría, ello nos permitirá trabajar menos o utilizar los recursos de una manera más eficiente. Desde una perspectiva biofísica, podemos dar dos tipos de respuesta. Por un lado, es cierto que el aumento de la productividad laboral puede conllevar una reducción del tiempo de trabajo. Pero con una condición: que aceptemos mantener nuestro nivel de consumo. La paradoja de Jevons nos enseña que los aumentos de eficiencia no se materializan al cien por cien. Cuando se produce un aumento de la productividad, lo más frecuente no es que se reduzca el tiempo de trabajo sino que crezcan los ingresos, lo que se traduce en un mayor consumo. Estudios recientes de nuestro grupo de investigación indican que el consumo de energía en nuestro tiempo de ocio está aumentando por encima de lo que aumenta el consumo total.

Asimismo, para evitar cuestionarnos la necesidad de reducir nuestro consumo en un contexto de escasez creciente de recursos, suele defenderse que las mejoras en la productividad del trabajo permitirán producir lo mismo con menos tiempo y menos recursos. El problema es que estas mejoras de productividad requieren la aplicación de tecnologías que entrañan un aumento del consumo de energía por hora trabajada. Por tanto, si en el futuro la energía escasea y su coste es prohibitivo, ya no podremos aumentar la productividad tan fácilmente. No habrá más remedio que reducir nuestros niveles de consumo.

CAMBIOS NECESARIOS

La economía ecológica se halla en una posición minoritaria en las facultades de ciencias económicas. Ello explica el nacimiento de varias iniciativas académicas, como el movimiento de la economía post-autista surgido en la Sorbona en 2000 o la Asociación de Economía Crítica en España. Estos colectivos critican la idea generalizada, y reforzada todavía más durante la presente crisis económica, de que solo hay una visión de la economía y del proceso económico. Asimismo, denuncian el excesivo énfasis que confiere la economía actual a los instrumentos matemáticos a costa de las teorías económicas alternativas y de la enseñanza de la historia económica. Es necesario que vuelvan a explicarse en nuestras universidades otras visiones del proceso económico, visiones que recuperen el interés por el proceso de producción y de distribución de bienes y servicios, no solo por el funcionamiento de los mercados.

Ese cambio en el mundo académico dotaría de mayor realismo a la enseñanza impartida en la universidad, lo que redundaría, a su vez, en una mayor flexibilidad de nuestros futuros economistas ante posibles eventualidades. Al ver el proceso económico desde el lado no solo monetario sino también biofísico, se podrían constatar mejor las repercusiones ambientales (en el uso de recursos y en la emisión de contaminantes) y sociales (uso del tiempo, distribución de la renta) de los diferentes escenarios de desarrollo o de las distintas políticas.



Un aumento en la productividad del trabajo no nos permitirá zafarnos de la dependencia respecto a la energía, pues precisamente estos aumentos entrañan un mayor uso de energía por hora de trabajo. Las reducciones del consumo energético deberán venir de reestructuraciones sociales que incluyan cambios en el modelo de desarrollo y los patrones de consumo.

FUENTES: AGENCIA INTERNACIONAL PARA LA ENERGÍA (*consumo energético*), ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO (*productividad laboral*).

PARA SABER MÁS

La ecología y la economía. J. Martínez Alier y Klaus Schlüpmann. Fondo de Cultura Económica, México, 1991.

La ley de la entropía y el proceso económico. N. Georgescu-Roegen. Fundación César Manrique, Lanzarote, 1996. Disponible en: **www.fcmanrique.org/publiDetalle.php?idPublicacion=107**

El metabolismo de la economía española. O. Carpintero. Fundación César Manrique, Lanzarote, 2005. Disponible en: **www.fcmanrique.org/recursos/publicacion/elmetabolismo.pdf**

On China's exosomatic energy metabolism: an application of multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM). J. Ramos-Martin, M. Giampietro y K. Mayumi, *Ecological Economics*, vol. 63, págs. 174-191, 2007.

Catalonia's energy metabolism: using the MuSIASEM approach at different scales. J. Ramos-Martín, S. Cañellas-Boltà, M. Giampietro y G. Gamboa en *Energy Policy*, vol. 37, págs. 4658-4671, 2009.

The metabolic pattern of societies: Where economists fall short. M. Giampietro, K. Mayumi, A. H. Sorman. Routledge, 2011.

Grupo de Investigación de Metabolismo de las Sociedades de la Universidad Autónoma de Barcelona: **www.societalmetabolism.org**

Asociación de Economía Ecológica en España: **www.ecoecoes.es**

Red Iberoamericana de Economía Ecológica: **www.redibec.org**

Gerhard Samulat es físico y periodista científico.



FÍSICA

Rayos X para escudriñar el nanocosmos

El proyecto europeo XFEL, actualmente en construcción en Hamburgo, será uno de los mayores láseres de electrones libres del mundo. Sus haces de rayos X permitirán estudiar la estructura de complejos moleculares y la cinética de las reacciones químicas

Gerhard Samulat

En cierto modo, el experimento recuerda al héroe de dibujos animados Lucky Luke, que desenfundaba el revólver más rápido que su sombra. Un equipo de investigadores dirigido por Henry Chapman, del Centro Científico de Láseres de Electrones Libres (CFEL), en Hamburgo, bombardea una diminuta muestra de nanocristales. Su arma: la Fuente de Luz Coherente del Acelerador Lineal de Stanford (LCLS); hoy por hoy, el láser de rayos X más potente del mundo. En un picosegundo (10^{-12} segundos), las moléculas del complejo proteico del fotosistema I se descomponen bajo los intensos campos electromagnéticos del láser. Su luminosidad supera más de mil millones de veces la de las fuentes de radiación al uso y puede calentar las moléculas a temperaturas diez veces más elevadas que las que reinan en la superficie del Sol.

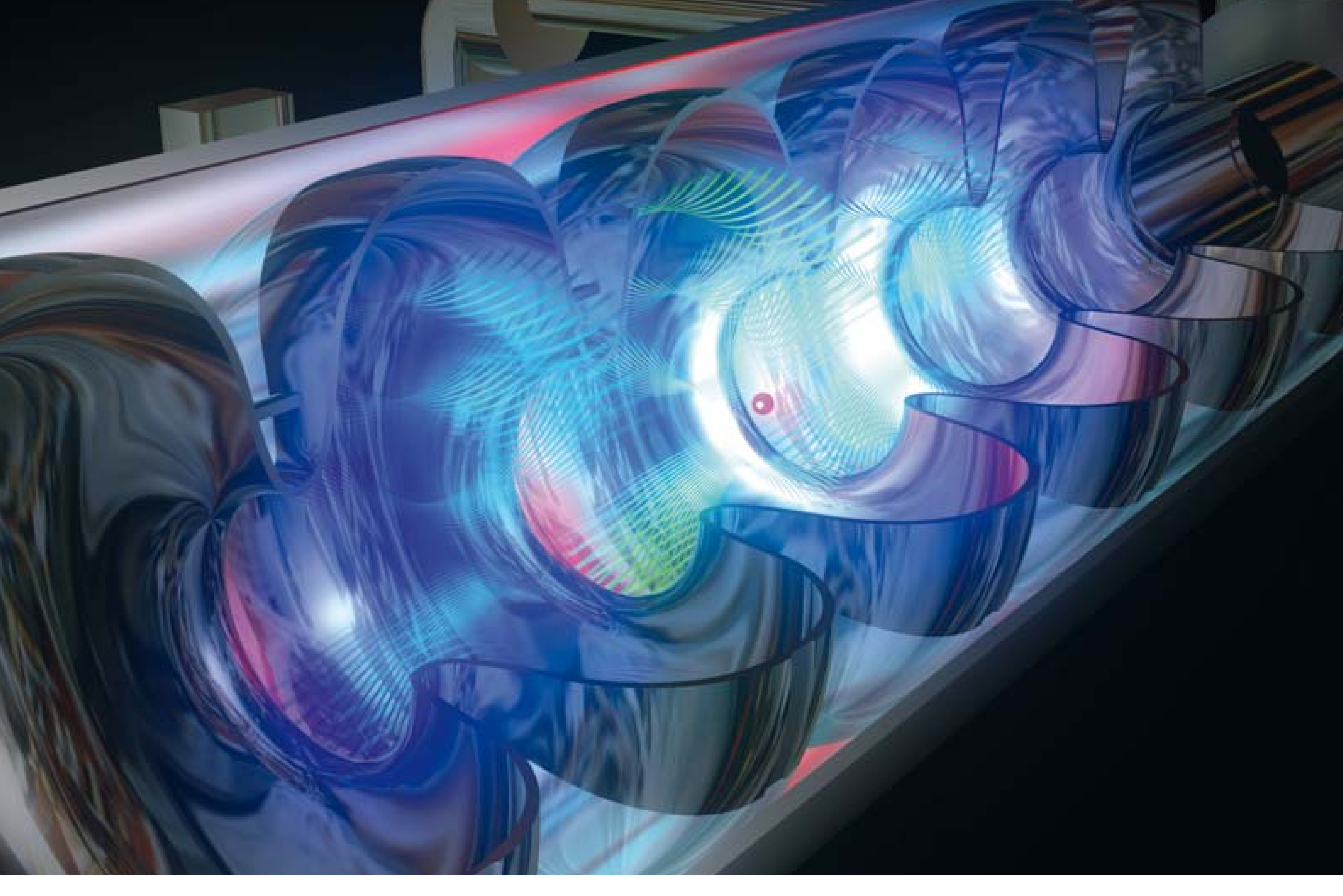
El equipo de Chapman ha dispuesto instrumentos de detección muy sensibles en torno a la muestra: su tarea consiste en registrar cada uno de los fotones dispersados por las moléculas. Para reemplazar a los nanocristales vaporizados por los fotones, unas 2000 veces por minuto cae sobre el haz láser otro de estos objetos, cuyo tamaño apenas alcanza unos cientos de nanómetros. La velocidad de transmisión de datos supera a la de los experimentos de física de partículas que lleva a cabo en Ginebra el Gran Colisionador de Hadrones.

EN SÍNTESIS

Los aceleradores de partículas se emplean cada vez más a menudo como fuentes de luz. La radiación emitida por partículas aceleradas a velocidades relativistas resulta especialmente útil para estudiar las propiedades de la materia a escala molecular.

Los láseres de electrones libres son un tipo particular de aceleradores que permiten generar haces coherentes de rayos X muy intensos y en pulsos muy cortos. Estas propiedades permiten lograr una resolución espacial y temporal sin precedentes.

Actualmente se está construyendo en Hamburgo el Láser de Electrones Libres de Rayos X Europeo, o XFEL. La instalación permitirá llevar a cabo experimentos antes irrealizables en disciplinas tan variadas como la química, la nanotecnología o la medicina.



El láser europeo de electrones libres XFEL comenzará sus operaciones científicas en 2015. Sus haces de rayos X permitirán descifrar los detalles atómicos de virus y células, así como filmar reacciones químicas. Hasta ahora, las muestras debían cristalizarse con anterioridad mediante un proceso largo y costoso. Los rayos X son emitidos por electrones que han sido acelerados a grandes velocidades. Esta representación artística ilustra el proceso.

DESY

Durante varios días, Chapman y sus colaboradores registran y digitalizan millones de patrones de difracción. A partir de los de mejor calidad, unos diez mil, reconstruyen una imagen tridimensional de la muestra. Los datos revelan un cristal perfecto, correspondiente al complejo proteico del fotosistema I, de gran importancia para la fotosíntesis. Los primeros experimentos que intentaron determinar la estructura de esta molécula tardaron trece años en hacerlo. Otra de las ventajas de la nueva técnica reside en que permite trabajar con nanocristales, los cuales pueden fabricarse con mayor facilidad que los cristales de proteínas cien veces mayores que se necesitan para los análisis habituales con radiación de sincrotrón.

MEDIR Y DESTRUIR

Tras investigar con proteínas, Chapman y sus colaboradores determinaron a principios del 2011 la estructura del mimivirus, uno de los mayores virus conocidos. Por lo general, para analizar la estructura de una biomolécula mediante experimentos de difracción, el primer paso consiste en obtener un cristal de dicha molécula, una tarea que puede llegar a prolongarse durante meses o años. Esos cristales se componen de un gran número de copias de la molécula dispuestas en orden, gracias a lo cual se amplifica el patrón de difracción. Con sus estudios sobre el mimivirus, el grupo de Chapman demostró que los láseres de rayos X de alta potencia permiten eludir el tedioso pro-

FUENTES DE LUZ

Sincrotrones y láseres

La radiación de sincrotrón se produce cuando se aceleran electrones a velocidades cercanas a las de la luz y se desvían mediante un campo magnético externo. Debido a los efectos relativistas, las partículas emiten radiación electromagnética, sobre todo en la dirección de vuelo. Los sincrotrones de tercera generación (al que pertenece, por ejemplo, el sincrotrón ALBA, en Barcelona) pueden producir luz en un continuo de longitudes de onda que llega hasta los rayos X, con pulsos de unos 100 picosegundos (1 picosegundo equivale a 10^{-12} segundos).

Los láseres de electrones libres son aceleradores de cuarta generación. En ellos, los electrones atraviesan un campo magnético oscilante que hace que el movimiento de las partículas entre en fase con la radiación que ellas mismas emiten. Como resultado, se produce luz coherente, como la generada por un láser. Este tipo de fuentes permite obtener luz láser en la banda de los rayos X duros, un objetivo difícil de lograr con láseres tradicionales (con una cavidad resonante formada por espejos) dada la dificultad para fabricar espejos que reflejen bien dicha radiación, muy energética. El XFEL podrá generar pulsos de pocos femtosegundos de duración (1 femtosegundo equivale a 10^{-15} segundos), lo que le permitirá «filmar» el desarrollo de reacciones químicas.

Emisión espontánea autoamplificada

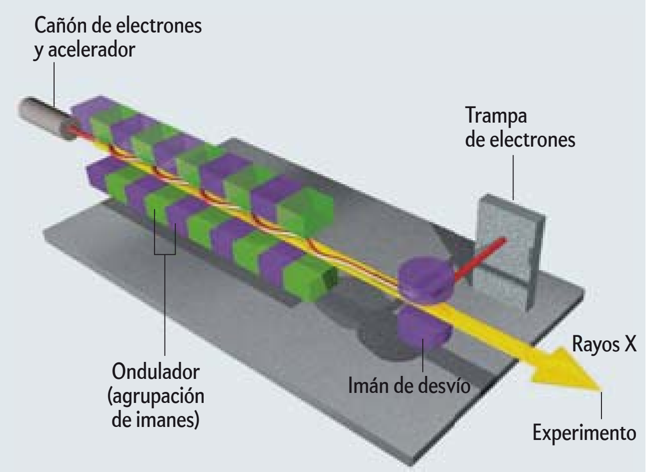
Un láser de electrones libres es un amplificador de luz, pero, a diferencia de un láser tradicional, la radiación es emitida por electrones que se desplazan a grandes velocidades y que no se encuentran ligados a ningún átomo.

En primer lugar, un acelerador comunica energía a los electrones hasta que estos alcanzan velocidades próximas a las de la luz. En el caso del Láser de Electrones Libres de Rayos X Europeo (European XFEL), el acelerador mide 2,1 kilómetros de longitud. Luego las partículas se dirigen hacia un dispositivo magnético denominado ondulador. Allí, una sucesión de imanes con los polos alternados genera un campo magnético oscilatorio que imprime a los electrones un rápido movimiento de zigzag. Como toda carga eléctrica acelerada, estos emiten ondas electromagnéticas.

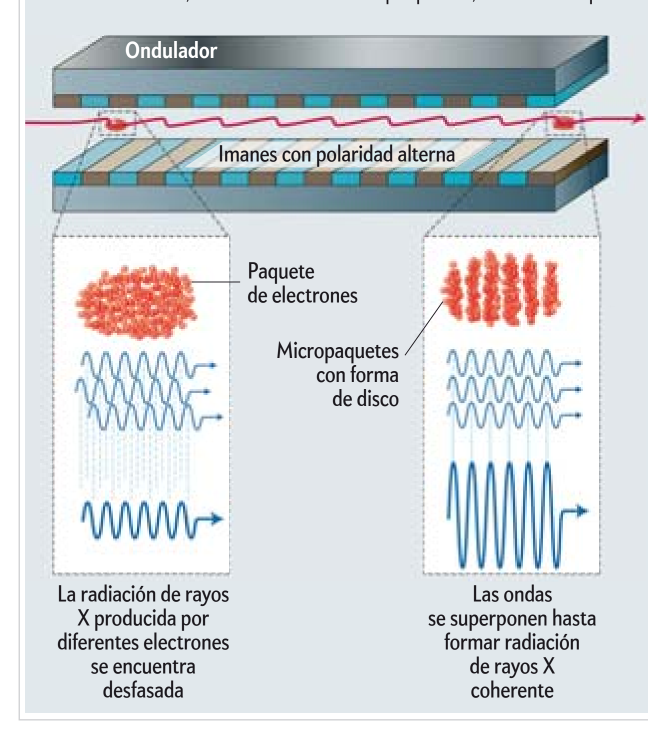
Un aspecto crucial de esta técnica reside en que el movimiento de cada electrón entra en fase con la radiación emitida por sus compañeros. Para ello, la energía de las partículas debe ajustarse con precisión a las características magnéticas del ondulador. Los electrones, que de otro modo se agruparían en paquetes relativamente homogéneos, adoptan una disposición muy bien definida. Los electrones más lentos se aceleran y los más veloces se ralentizan.

Las partículas se organizan en pequeñas agrupaciones con forma discoidal, denominadas micropaquetes, las cuales quedan separados por una distancia igual a la longitud de onda de la radiación. Como consecuencia, la luz que emiten se superpone casi a la perfección y se forma un intenso haz de luz coherente, tal y como ocurre en un láser común. Los expertos denominan este principio «emisión espontánea autoamplificada», o SASE, por sus siglas en inglés (por oposición a *láser*, acrónimo que hace referencia a un proceso de emisión estimulada). Los onduladores deben cubrir una longitud considerable. En el láser de electrones libres Flash, del Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY), miden unos 30 metros. Los del XFEL llegarán a los 250 metros.

Como alternativa, puede emplearse un láser externo de la longitud de onda adecuada para inyectar radiación en los paquetes de electrones, a fin de que estos formen micropaquetes con una distribución temporal precisa. Este procedimiento de inyección, o estimulación, probablemente sea incorporado al XFEL, así como al Flash y al SwissFEL, que se construirá en el Instituto Paul Scherrer, en Suiza. En el XFEL se prevé instalar asimismo un ondulador antepuesto cuyo objetivo consistirá en reducir la longitud de onda del haz.



Las partículas generadas por un cañón de electrones son aceleradas y guiadas a través de un ondulador. Allí comienzan a emitir radiación de rayos X debido a efectos relativistas. Después, los electrones son desviados por un imán y «eliminados».



Cuando un haz de electrones entra en el ondulador, los campos magnéticos alternos zarandean las partículas de un lado para otro y provocan así una emisión de rayos X. Bajo la influencia de la radiación que ellos mismos emiten, los electrones forman micropaquetes con forma de disco que se suceden en intervalos separados por una longitud de onda. En consecuencia, las ondas emitidas se amplifican hasta formar un intenso haz coherente de rayos X.

DESY (*cañón*); DE *NATURE PHOTONICS* N.º 4, PÁGS. 814-821, 2010 (*ondulador*)

ceso de cristalización. Tal vez algún día sea posible analizar con este método incluso células vivas: si se alcanzase una intensidad lo suficientemente elevada, un solo destello de rayos X debería bastar para analizar toda su estructura; tras lo cual, eso sí, esta quedaría destruida por completo.

El proyecto Láser de Electrones Libres de Rayos X Europeo (European XFEL), actualmente en construcción en las inmediaciones de Hamburgo, tiene como objetivo avanzar por esa vía en la investigación del nanomundo: «Su elevada intensidad y luminosidad nos permitirán analizar en un instante objetos de escala nanoscópica o macromoléculas aisladas», explica Massimo Altarelli, director del proyecto. Altarelli cuenta con una dilatada experiencia en la construcción de aceleradores. Sus primeras investigaciones en física de rayos X se remontan a su época de estudiante, tras la cual se incorporó al Instituto Max Planck de Materia Condensada en Stuttgart. Después dirigió el Laboratorio de Campos Magnéticos Intensos de Grenoble, la Fuente Europea de Radiación de Sincrotrón (ESRF), sita en la misma

ciudad, y el Laboratorio de Luz de Sincrotrón Elettra, en Trieste. Ahora se encuentra a cargo del proyecto XFEL, cuya puesta en funcionamiento se espera para 2015.

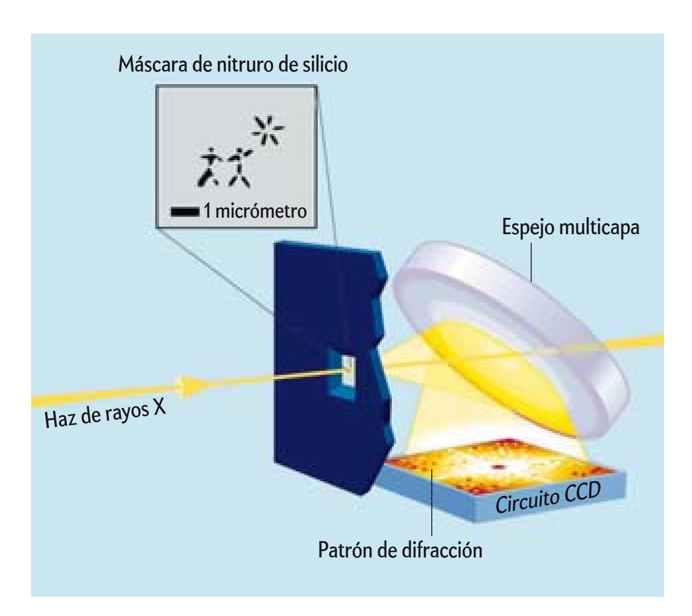
En el pasado, los grandes aceleradores eran una herramienta casi exclusiva de los físicos de partículas. Cada vez con mayor frecuencia, sin embargo, su dirección queda a cargo de expertos en materia condensada o física de materiales, como Altarelli. Y es que junto a la biología estructural, que se perfila como uno de los principales campos de aplicación de los láseres de rayos X, estas fuentes de luz resultan igual de aptas para la investigación en materia condensada o física de superficies. Entre las prioridades de este campo destacan los estudios sobre transiciones de fase o sobre cinética de reacciones químicas; por ejemplo, en fotoquímica y catálisis. Al fin y al cabo, la mayoría de los procesos industriales que emplean catalizadores se aplican como una receta de cocina: se sabe lo que hay que hacer, pero no siempre se conocen los porqués. «Es como cocinar un *risotto*», explica Altarelli. «Pero si comprendiésemos los mecanismos atómicos que tienen lugar durante la catálisis, podríamos optimizar dichos procesos con fines concretos», añade. Ello permitiría aumentar de forma notable la eficiencia de las técnicas de producción y purificación, tanto desde el punto de vista energético como desde el de los materiales empleados.

No solo los científicos lo ven así. La demanda de la industria también aumenta, añade Helmut Dosch, presidente de la junta directiva del Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY), emplazado asimismo cerca de Hamburgo. Dosch, físico de la materia condensada, fundó el CFEL con la participación de la Sociedad Max Planck y la Universidad de Hamburgo. «Una reacción química es algo mucho más complejo de lo que enseñamos en las universidades», explica. Numerosos expertos, por ejemplo, se muestran convencidos de que la función de los ribosomas (los complejos encargados de sintetizar proteínas en la célula) no queda determinada de manera exclusiva por la composición o el plegamiento de las moléculas. «Un láser de rayos X nos permitiría observar estos procesos, tomar imágenes holográficas de unos pocos femtosegundos de duración y combinarlas para formar una suerte de película». La mayoría de las reacciones químicas transcurren en esta escala de tiempo (un femtosegundo corresponde a 10^{-15} segundos, una milbillonésima de segundo).

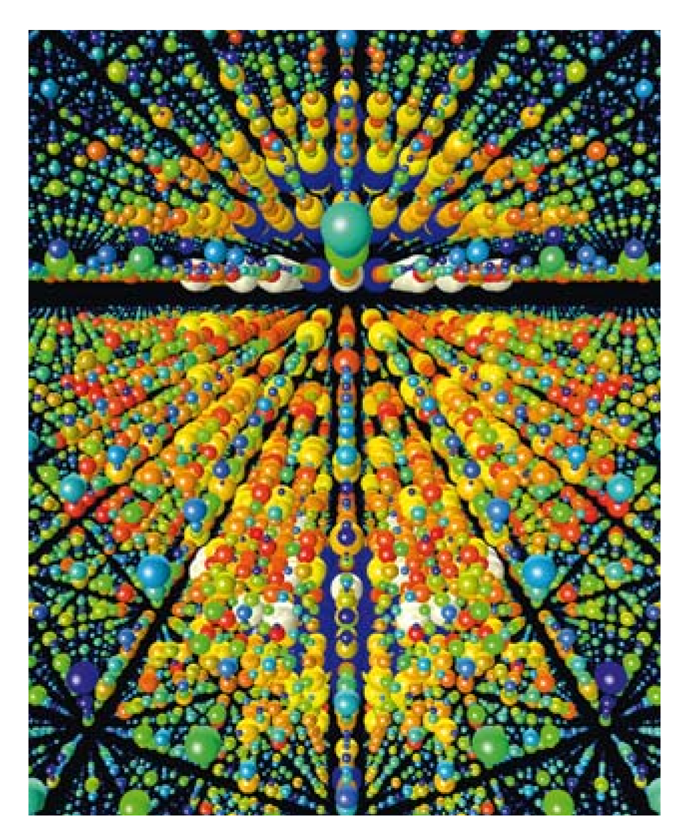
RAYOS X DE GRAN CALIDAD

El DESY ya cuenta con un láser superconductor de electrones libres, el Flash, similar al futuro XFEL. Sin embargo, su tamaño no basta para alcanzar longitudes de onda inferiores al nanómetro, tal y como requieren los experimentos mencionados. Según Altarelli, ambos proyectos se complementarán: el XFEL producirá rayos X duros, de energía muy elevada; el Flash, rayos X blandos. En las instalaciones del DESY se encuentran asimismo los aceleradores circulares PETRA III y DORIS III. Aunque emiten radiación de sincrotrón en la banda de los rayos X, no ofrecen la intensidad ni la resolución temporal necesarias para hacer visibles procesos químicos o biológicos rápidos. La duración del pulso en estos sincrotrones asciende a entre 20 y 50 picosegundos, unas mil veces más largos que los que producirá el XFEL.

En un principio, dichos aceleradores se construyeron para llevar a cabo experimentos en física de partículas. Gracias a ellos se han descubierto varias partículas elementales y se han analizado las fuerzas que median entre ellas. En la actualidad, sin embargo, y tras varias reconstrucciones, se dedican de manera



Las imágenes de difracción con rayos X se obtienen según un principio sencillo. El haz impacta sobre la muestra (en la imagen, una máscara de nitruro de silicio con patrones grabados). La luz dispersada se desvía mediante un espejo hacia un circuito integrado CCD, que hará las veces de cámara digital. Un algoritmo reconstruye a partir de los datos registrados la imagen de la muestra. Esta quedará destruida en una milésima de nanosegundo a causa de la elevada intensidad de la luz.



Representación tridimensional de patrones de difracción obtenidos a partir de una muestra de 15.000 nanocristales. Aunque el láser de rayos X los destruyó, antes pudo determinar su estructura. El tamaño y el color de las esferas representan la intensidad de la luz dispersada en cada punto.

DESY (esquema del proceso y patrón de difracción)

exclusiva a las investigaciones con radiación de sincrotrón. Ofrece de ello un buen ejemplo la metamorfosis del DESY: el otrora centro internacional de física de partículas se ha convertido hoy en una verdadera fábrica de fotones, cuyas prestaciones sirven a una variopinta comunidad compuesta por físicos, químicos, biólogos o médicos. También geólogos y planetólogos trabajan allí, pues la radiación de rayos X se presta de igual modo al análisis de la materia en condiciones de presión y temperatura extremas, como las que reinan en el interior de la Tierra o durante la formación de planetas. «A pesar de todo, los láseres de rayos X no desbancarán a los sincrotrones. Para numerosos fines, estos resultan más adecuados que los primeros», destaca Altarelli.

Una vez terminado, el XFEL emitirá hasta 27.000 destellos de rayos X ultracortos por segundo, frente a los 120 por segundo que genera el LCLS de Stanford. Además, cada haz será mil millones de veces más luminoso que los que emiten las fuentes habituales de rayos X. A tal fin, 800 resonadores de cavidad superconductores acelerarán los electrones hasta una energía de 17,5 gigaelectronvoltios. Después, las partículas serán inyectadas en los onduladores del complejo, donde intensos campos magnéticos los harán oscilar para que emitan rayos X coherentes. Como pone de relieve el trabajo de Chapman, basado en millones de imágenes, la capacidad para generar un número tan elevado de pulsos por segundo reviste gran importancia en el análisis de nanocristales. «Podremos llevar a cabo experimentos irrealizables en otros laboratorios», asegura Altarelli. Su confianza está justificada: ya en el DESY, los turnos de medición suelen reservarse por partida doble o incluso triple.

El XFEL funcionará unas 4000 horas al año. Por razones de presupuesto comenzará con solo tres osciladores, pero los ingenieros ya están excavando los túneles que acogerán un total de cinco de estas agrupaciones de imanes dipolares. «Si no, más tarde sería imposible ponerse al día», apunta Altarelli. Y añade: «En una fase posterior también intentaremos disminuir aún más la longitud de onda». La experiencia con el LCLS sugiere que, sin grandes esfuerzos técnicos y sin financiación adicional, la resolución debería poder aumentarse hasta los 0,05 nanómetros; aproximadamente, un radio atómico.

También se han pensado soluciones para paliar la escasez de espacio en el XFEL. En los aceleradores circulares pueden realizarse varios experimentos al mismo tiempo, ya que la radiación puede escapar del anillo tangencialmente en todos sus puntos. El instrumento de Hamburgo, en cambio, es lineal. Por ello, unos conmutadores magnéticos se encargarán de que los paquetes de electrones se distribuyan entre varios onduladores en tan solo fracciones de segundo. Altarelli calcula que, en

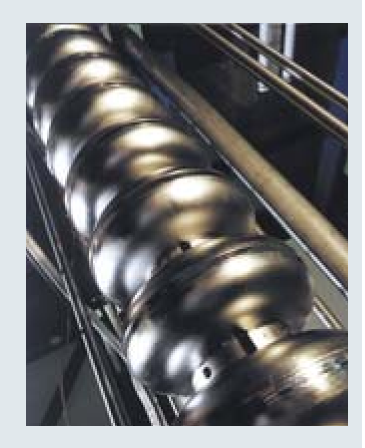
ACELERACIÓN DE LOS ELECTRONES

Del cañón al acelerador

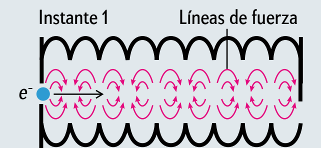
La calidad de los rayos X queda determinada por el cañón de electrones situado al principio del dispositivo. En el láser de electrones libres Flash, del DESY, un pulso láser ultrarrápido de luz ultravioleta impacta sobre un fotocátodo de telururo de cesio y provoca la emisión de una nube de miles de millones de electrones. Esa nube debe poseer un diámetro lo menor posible y una densidad de partículas muy elevada.

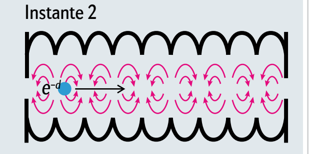
Para que los electrones no se dispersen —como consecuencia de la repulsión que experimentan las cargas de idéntico signo—, son acelerados a velocidades cercanas a la de la luz. En el Flash, el dispositivo acelerador se halla justo después del cañón de electrones y consiste en un pequeño resonador de cavidad de cobre, de conducción eléctrica normal y conectado a una tensión alterna. Este trabaja con una potencia pulsada de cinco millones de vatios y liberada una vez cada pocos milisegundos, lo que produce intensidades de entre 40 y 50 megavoltios por metro. En el resonador se forman microondas estacionarias cuya fase se encuentra adaptada a las nubes de electrones, por lo que estos experimentan siempre una aceleración hacia delante. Un campo magnético enfoca los paquetes de electrones, gracias a lo cual se obtiene un haz de partículas de gran calidad, compuesto por numerosos paquetes. El modo pulsado evita, además, que el resonador se caliente en exceso y que, como consecuencia, se alteren sus frecuencias propias; en tal caso, se perdería la sincronía con el acelerador.

El dispositivo de aceleración del XFEL será superconductor. Las microondas generadas poseerán una frecuencia de 1,3 gigahercios, lo que corresponde a una longitud de onda de unos 23 centímetros. Están diseñados para generar intensidades de campo de unos 24 megavoltios por metro, aunque probablemente puedan superar dicho valor, explica Hans Weise, directivo del proyecto. Los resonadores se encuentran fabricados con niobio. Cuando este metal se enfría a 271 grados Celsius bajo cero (dos grados Kelvin sobre el cero absoluto), su resistencia eléctrica se anula y se torna superconductor. Dado que entonces no existen pérdidas, casi toda la potencia eléctrica empleada puede transferirse a las microondas y a las partículas.



Más de 800 resonadores de cavidad, cada uno de más de un metro de largo y formado por nueve células individuales, se interconectan para acelerar los electrones. A lo largo del eje del módulo vibran microondas estacionarias sobre las que «cabalgan» los portadores de carga, que de esta manera ganan energía.





Las ondas estacionarias en los resonadores se ajustan de tal manera que los electrones siempre sean acelerados hacia delante (*izquierda*). Antes de que la onda se invierta y ejerza un efecto de frenado, las partículas ya se encuentran en la próxima célula (*derecha*), donde serán aceleradas de nuevo.

DESY (*fotografía*); SEGÚN GUIDO KOCH, TU MÜNCHEN (*ilustración*)

PROYECTOS

Las fuentes de luz del futuro

La idea del láser de electrones libres se remonta a finales de los años sesenta del siglo XX. En 1976, John M. Madey desarrolló junto con sus colaboradores el primer prototipo en la Universidad Stanford. El principio de emisión espontánea autoamplificada fue analizado por vez primera por los físicos Anatoli M. Kondratenko y Evgeni L. Saldin. En 1995, Saldin comenzó a someter a prueba su teoría en el aparato de pruebas Tesla, del DESY, a partir del cual se desarrolló el actual acelerador Flash.

Hoy funcionan en todo el mundo unas dos docenas de láseres de electrones libres; varios más se hallan en fase de construcción y planificación. La mayoría han sido diseñados para operar con una longitud de onda determinada: los del Centro de Investigación de Dresden-Rossendorf, por ejemplo, funcionan en el infrarrojo medio y lejano (con longitudes de onda de entre 4 y 250 micrómetros), y el Flash del DESY, en el ultravioleta y los rayos X blandos (con longitudes de onda de entre 4 y 30 nanómetros). La radiación de menor longitud de onda (0,15 nanómetros) se produce actualmente en el láser de electrones libres LCLS, en el Acelerador Lineal de Stanford.

Los dispositivos futuros se beneficiarán de unas prestaciones muy superiores. En particular, gozarán de una luminosidad mucho mayor y emitirán luz con longitudes de onda inferiores a los 0,1 nanómetros. El ya inaugurado SACLA, en el centro japonés SPring-8, cerca de Osaka, pertenece a esta clase de láseres de rayos X, así como el XFEL europeo y el SwissFEL, que se construirá en el Instituto Paul Scherrer, en Suiza.

un principio, podrán realizarse hasta tres experimentos a la vez; más tarde, quizá sean seis. El encauzamiento se realizará cada 2700 pulsos, cada uno de los cuales distará 220 nanosegundos del siguiente.

ÚLTIMAS MEJORAS

Los técnicos también consideran la posibilidad de estimular los onduladores inyectando luz láser de la frecuencia adecuada. Sin embargo, un láser de titanio y zafiro con pulsos de femtosegundos de duración, como el pensado para la ampliación de Flash, no servirá, pues su longitud de onda sería demasiado larga. En consecuencia, el equipo del XFEL intentará filtrar la radiación necesaria en otro ondulador. El procedimiento se ensayará previamente en Stanford. Si llevarlo a cabo resulta tan fácil como creen los expertos, el instrumento probablemente se instale en el XFEL.

De un modo u otro, a partir de 2015 el proyecto europeo XFEL brindará a los científicos la oportunidad de vislumbrar el nanocosmos a la luz de los rayos X. Gracias a su nueva herramienta, podrán hacerlo con más precisión que nunca y a un ritmo frenético.

PARA SABER MÁS

Láseres de electrones libres. Henry P. Freund y Robert K. Parker en *Investigación y Ciencia* n.º 153, junio de 1989.
La luz de sincrotrón. Josep Campmany, Joan Bordas y Ramón Pascual en *Investigación y Ciencia* n.º 281, febrero de 2000.
Femtosecond X-ray protein nanocrystallography. H. N. Chapman et al. en *Nature*, vol. 470, págs. 73-77, 3 de febrero de 2011.
Página oficial del proyecto European XFEL: **www.xfel.eu**



EXPLORACIÓN ESPACIAL

DESTINO:

Puede que el próximo vehículo explorador que ronde por la superficie lunar no sea desarrollado por la NASA, sino por estudiantes universitarios y empresas privadas

Michael Belfiore

FOTOGRAFÍAS DE ANDREW HETHERINGTON



LA LUNA

En su campo de pruebas en Pittsburgh, William Whittaker y sus colaboradores ensayan el control remoto del *Red Rover*, un vehículo explorador que esperan que llegue a la Luna en 2015.

Michael Belfiore es periodista especializado en innovaciones científicas y técnicas. Ha escrito *Rocketeers: How a visionary band of business leaders, engineers and pilots is boldly privatizing space* (HarperCollins, 2008).



En un campo cubierto de lodo y escombros, a orillas del río Monongahela, en Pittsburgh, un robot piramidal de un metro y medio de altura, con dos cámaras gemelas a modo de ojos, gira lentamente sobre cuatro ruedas metálicas. En un remolque cercano, un grupo de estudiantes de la Universidad Carnegie Mellon se agolpa en torno a un ordenador portátil para ver el mundo a través de los ojos del robot. En las imágenes en escala de grises y de baja resolución que muestra la pantalla se observa un paisaje lleno de baches muy similar al destino final del robot: la Luna.

William «Red» Whittaker, profesor de robótica en Carnegie Mellon, y sus alumnos han construido el vehículo explorador *Red Rover* para ganar la competición Google Lunar X PRIZE. La iniciativa pretende impulsar el papel de las empresas privadas en la exploración espacial y estimular así la innovación tecnológica en los vuelos espaciales. El premio, de 20 millones de dólares, se adjudicará al primer equipo no gubernamental que lleve un robot hasta la superficie de la Luna, consiga que este recorra al menos 500 metros y envíe a la Tierra un vídeo de alta definición, todo ello para finales de 2015. Un segundo premio de 5 millones de dólares y varios accésits para quienes logren otros objetivos, como llegar hasta el lugar en el que alunizó alguna de las misiones Apolo, elevan el monto total de premios hasta los 30 millones de dólares. Aunque hay 26 equipos en competición, el de Whittaker se perfila como ganador. Su compañía, Astrobotic Technology, fue la primera en pagar un anticipo al cohete que transportará su nave espacial y su vehículo explorador hasta la Luna. En el pasado, Whittaker ha demostrado ser un excelente constructor de vehículos capaces de operar en las condiciones más extremas.

La competición Google Lunar X PRIZE llega en un momento crucial para el programa espacial de EE.UU. En 2010, siguiendo las recomendaciones de un comité de expertos, Barack Obama ordenó a la NASA que fomentase la participación privada en los viajes al espacio como fórmula para sustituir al retirado transbordador espacial. La estrategia pretende que, con la colaboración y financiación iniciales por parte de la NASA, las empresas privadas diseñen y construyan naves espaciales con mayor rapidez y a un precio más razonable que los habituales grandes contratistas de la agencia espacial.

En este espíritu, la competición Google Lunar X PRIZE busca fomentar un nuevo modelo de misiones planetarias privadas, uno que no dependa de una nave espacial costosa y exclusiva, ni de compromisos políticos cuya duración en ocasiones no supera la de una legislatura. En su lugar, los investigadores contratarían a empresas privadas para llevar al espacio sus instrumentos y vehículos exploradores. La NASA ha añadido sus propios incentivos: una aportación adicional de 30 millones de dólares, divididos entre seis equipos, para superar los inconvenientes técnicos con los que se han topado numerosos vehículos exploradores gubernamentales, como resistir la noche lunar. Nadie sabe con certeza qué ocurrirá con las empresas privadas de vuelos espaciales después del Google Lunar X PRIZE. Aunque no todos creen que exista un mercado para sus servicios, numerosos investigadores manifiestan su entusiasmo ante la idea de una ciencia espacial financiada comercialmente.

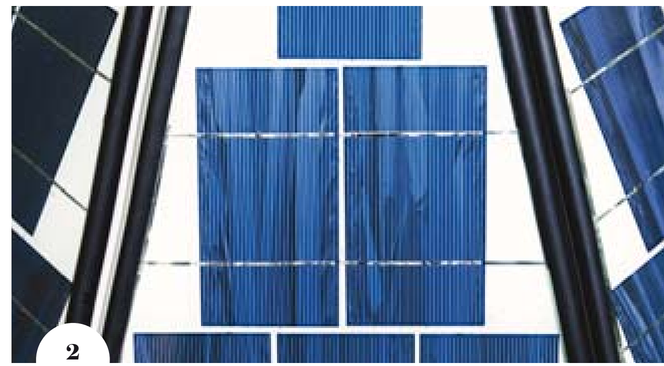
EN SÍNTESIS

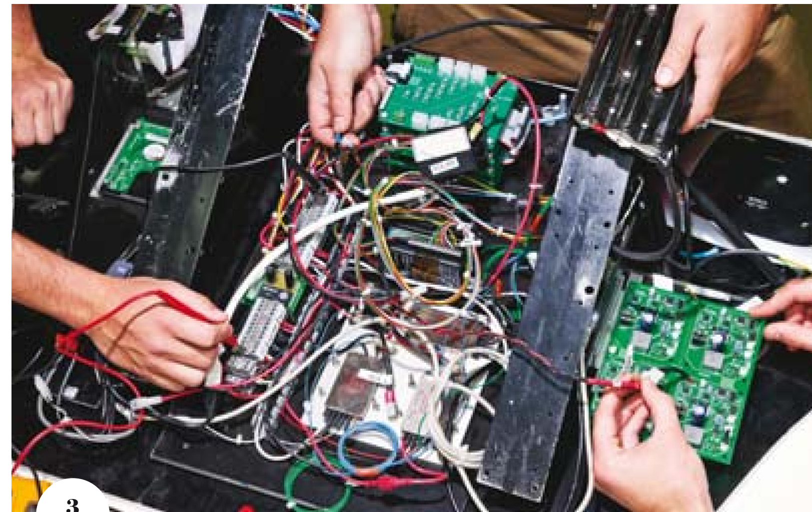
Tras la retirada del trasbordador espacial, la NASA intenta promover la participación de empresas privadas para enviar astronautas y experimentos al espacio.

La competición Google Lunar X PRIZE ofrece 20 millones de dólares al primer equipo no gubernamental que transporte con éxito un vehículo explorador hasta la Luna.

Uno de los 26 participantes es el equipo de Astrobotic. Su líder, William Whittaker, es uno de los mayores expertos mundiales en robótica de campo.







El líder del equipo Astrobotic, William Whittaker, posa al lado de un modelo a escala 1/10 del cohete Falcon 9, que lanzará su robot al espacio (*1*). La superficie del *Red Rover* se encuentra revestida con células solares que permiten captar la luz solar desde diferentes ángulos (*2*). Los componentes electrónicos del vehículo explorador han sido construidos para sobrevivir al frío y el calor extremos de la noche y el día lunares (*3*).

LANZAMIENTO DE PRUEBA

La iniciativa cuenta con un precedente: el Ansari X PRIZE, de 10 millones de dólares, que finalizó en 2004 cuando el SpaceShipOne se convirtió en el primer vehículo tripulado fabricado por iniciativa privada que abandonó la atmósfera. El SpaceShipOne, un avión cohete construido por Scaled Composites, fue sufragado por el multimillonario de Microsoft Paul Allen. La financiación del SpaceShipTwo corre ahora a cargo de Virgin Galactic. Ya ha recibido más de 60 millones de dólares de particulares dispuestos a pagar 200.000 dólares a cambio de una oportunidad para flotar en condiciones de microgravedad y contemplar la Tierra desde el espacio. La NASA ha contratado a Virgin y otras seis empresas para que transporten equipo científico a bordo del SpaceShipTwo y otra nave espacial más, a fin de realizar varios experimentos sobre asuntos peliagudos, como la transferencia de combustible en ausencia de gravedad. Los organizadores del Google Lunar X PRIZE esperan ahora repetir este éxito con misiones planetarias robóticas.

Pocas personas se encuentran tan bien cualificadas como Whittaker para llevar un robot a la Luna. Puede que este hombre de 63 años haya contribuido más que ninguna otra persona al desarrollo de la robótica de campo, la disciplina que estudia el diseño de robots que han de llevar a cabo sus tareas en un ambiente hostil. Durante los años ochenta, Whittaker construyó los robots que debían explorar las zonas dañadas del accidentado reactor nuclear de Three Mile Island. Desde entonces, como fundador y director del Centro de Robótica de Campo de la Universidad Carnegie Mellon, Whittaker no ha dejado de innovar en el diseño de vehículos autónomos. Sus robots han recuperado meteoritos en el Polo Sur y han escalado cráteres de volcanes activos en Alaska y la Antártida.

Whittaker comenzó a planear su participación en el Google Lunar X PRIZE en 2007, mientras tomaba parte en la competición Desafío Urbano, convocada por la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa. Whittaker y sus alumnos se asociaron con General Motors, Continental y otros patrocinadores para desarrollar un Chevrolet Tahoe sin conductor. A pesar de salir victorioso en la primera carrera internacional de vehículos autónomos por las calles de una ciudad, Whittaker no estaba malgastando el tiempo cuando, por aquel entonces, acabó de planificar un curso en Carnegie Mellon sobre desarrollo de robots móviles avanzados. Según quedaban descritos en la oferta académica, los objetivos de la asignatura consistían en «detallar, analizar y simular un vehículo de alunizaje robótico, probar un prototipo de vehículo explorador lunar y comunicar el desarrollo de la misión a través de mensa-

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA

Barcelona Moon Team

Un vehículo explorador para buscar hielo y estudiar la posibilidad de extraer oxígeno del suelo lunar

IGNASI CASANOVA Y MARC ZABALLA

El Barcelona Moon Team (BMT) es el único equipo con sede en España inscrito en la competición Google Lunar X PRIZE. Se encuentra liderado por Galactic Suite, una empresa radicada en Barcelona que persigue promover el acceso privado al espacio, y la compañía tecnológica Altran. Desde 2010, a este consorcio se han unido el Centro de Tecnología Aeroespacial, la Universidad Politécnica de Cataluña y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, así como las empresas GMV, EADS CASA Espacio y Thalea Alenia Space.

A fin de completar los aspectos relativos al lanzamiento y al subsistema de propulsión, el equipo contará con la participación de China Great Wall Industry Corporation. El lanzamiento tendrá lugar a cargo del cohete chino Long March durante la segunda mitad de 2014.

Después de tres días de vuelo, el aterrizador de la misión realizará la inserción en una órbita lunar baja. Una vez allí efectuará las operaciones de comprobación y puesta a punto para el alunizaje, que será casi automático. El aterrizador ha sido concebido para ajustarse a la masa que el cohete seleccionado puede colocar en órbita translunar y atendiendo a la simplicidad en el diseño. Así pues, incorporará todos los subsistemas necesarios, como el equipo de propulsión (con un motor de ajuste variable), ordenadores de a bordo, sensores y actuadores de control de navegación y guiado, generación de potencia con paneles solares, sistema de comunicaciones, cámaras, etcétera.

Bajo la plataforma del aterrizador existe espacio para alojar el vehículo explorador del BMT, de cuatro ruedas y equipado con paneles solares para conseguir una autonomía de, como mínimo, 5000 metros de recorrido. El explorador permanecerá operativo durante dos semanas (un día lunar, para aprovechar el sol).

Pero los objetivos del BMT van más allá de cumplir con los requisitos de la competición. Como demuestra la historia de la exploración espacial, los descubrimientos científicos y las innovaciones tecnológicas han sido siempre los bienes más duraderos de toda misión al espacio. Cuarenta años después de que las últimas muestras lunares recogidas por la misión Apolo 17 llegasen a la Tierra, su estudio sigue proporcionando datos de interés sobre la evolución de nuestro satélite natural.

jes escritos, fotografías y vídeos». El curso quedaba abierto a estudiantes de Carnegie Mellon de todas las disciplinas y niveles. Por entonces, Whitakker fundó Astrobotic Technology, una empresa con ánimo de lucro, bajo la dirección de David Gump, un veterano empresario espacial. Gump se encarga de buscar el patrocinio de empresas y posibles clientes, mientras que Whittaker aporta los conocimientos técnicos que se ha granjeado tras más de 29 años de investigación. Entre los patrocinadores de Astrobotic se encuentra la compañía Alcoa, de Pittsburgh, que ha donado el aluminio necesario para la nave espacial que transportará el vehículo explorador hasta la Luna.

Whittaker explica que el alunizaje de una de sus creaciones representaría la culminación de una carrera en la que ha visto a sus robots trabajar en condiciones extremas en tierra, agua, bajo tierra y bajo el agua. Para Whittaker, triunfar en la Luna no se reduce a conseguir el primer premio: espera cumplir también con todos los objetivos suplementarios de la competición.

CIENCIA ESPACIAL

El proyecto de Whittaker comienza con el cohete Falcon 9, de SpaceX. Fundada con el objetivo de reducir de manera sustancial los costes para acceder al espacio, SpaceX quizá se convierta en el engranaje clave del Google Lunar X PRIZE. Whittaker cree que el vehículo de la compañía será el elegido por todos los participantes. «Por lo que sé, todos los competidores procedentes de EE.UU. se han dirigido a SpaceX», explica. El lanzamiento supondrá la mayor partida de gasto para todos ellos. Aunque más económico que otros cohetes de su clase, el precio

CORTESÍA DE LA FUNDACIÓN X PRIZE (*Euroluna, JURBAN, Synergy Moon, Italia y White Label Space*); CORTESÍA DE ODYSSEY MOON (*Odyssey Moon*); CORTESÍA DE PULI SPACE (*Puli Space*)

OTROS PARTICIPANTES

Vehículos exploradores

Veintiséis equipos de todo el mundo compiten por el Google Lunar X PRIZE. Antes de finales de 2015 deben construir un vehículo explorador, llevarlo con éxito hasta la Luna, conseguir que recorra 500 metros y enviar un vídeo de alta resolución.



Euroluna
Euroluna planea construir un vehículo explorador de cuatro ruedas impulsado por energía solar. Solo pesará 50 kilogramos.



JURBAN
Los pequeños robots vermiformes de JURBAN podrán agruparse como un ciempiés o dividirse para llevar a cabo distintas tareas.



Odyssey Moon
Odyssey Moon fue el primer equipo que se inscribió en la competición. Su nave de alunizaje se basa en los diseños de la NASA.

Uno de los hitos recientes en la investigación sobre nuestro satélite ha sido, sin duda, el descubrimiento en 2009 de la existencia de agua. Esta se encuentra en forma de hielo, probablemente mezclado con el regolito (polvo) que cubre la superficie lunar. La manera en que ese hielo ha llegado hasta la Luna y cómo ha logrado conservarse en un astro yermo, carente de atmósfera y sometido a unas condiciones ambientales extremas constituye uno de los campos más activos de la investigación lunar.

Por ello, el vehículo explorador del BMT transportará el experimento SELENA, el cual intentará, por vez primera sobre el terreno, constatar la existencia de hielo en nuestro satélite. Además, el experimento investigará la posibilidad de extraer oxígeno a partir de las rocas más comunes que pueblan la superficie lunar (basaltos). El vehículo explorador incluirá asimismo seis espacios adicionales de $10 \times 10 \times 10$ centímetros para alojar otros experimentos de volumen reducido.

Aparte de cumplir con los retos de la competición y con la labor investigadora descrita, el vehículo del BMT ha sido diseñado para transportar hasta 25 kilogramos de carga de pago, a un precio de 800.000 euros el kilogramo. La carga se ofrece a compañías farmacéuticas, empresas comerciales e, incluso, a las agencias nacionales, que pueden ver en la misión española un banco de pruebas para futuras misiones a nuestro satélite.

Ignasi Casanova investiga en la Universidad Politécnica de Cataluña y es director científico del BMT. Marc Zaballa, de Galactic Suite, es director asociado del BMT.



Representación del vehículo explorador del Barcelona Moon Team sobre la superficie de la Luna.

anunciado para un lanzamiento del Falcon 9 asciende a 54 millones de dólares. Los competidores de SpaceX se muestran reacios a hablar sobre sus ofertas, pero SpaceX ya ha influido en el mercado con el mayor contrato individual de lanzamiento de la historia: un acuerdo de 492 millones de dólares con Iridium, una compañía de satélites de comunicaciones.

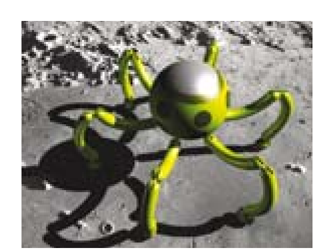
Después de que el *Red Rover* abandone la atmósfera terrestre a bordo del Falcon 9, el conjunto formado por la nave espacial y el vehículo explorador de Astrobotic se desprenderá de su cubierta aerodinámica, con forma de morro, y el motor de la segunda etapa del cohete pondrá rumbo a la Luna. El viaje durará cinco días, guiado por los programas informáticos de dirección, navegación y control desarrollados en Carnegie Mellon. Estos han sido elaborados a partir del código que permitió al equipo de Whittaker ganar la competición Desafío Urbano, pues los retos informáticos que plantea la conducción autónoma de un automóvil y el pilotaje de una nave espacial no resultan tan distintos. La principal diferencia, aclara Kevin Peterson, estudiante de doctorado y miembro del equipo de Astrobotic, se debe a que la nave espacial no podrá usar el sistema GPS. En su lugar, tomará como referencia las estrellas, la Luna y la Tierra.

Una vez en órbita alrededor del satélite, la nave y el vehículo explorador deberán descender sobre el suelo lunar. En 1969, fue Neil Armstrong quien pilotó el módulo desde la órbita hasta la superficie de la Luna, al tiempo que evitaba obstáculos peligrosos, como rocas o cráteres. Pero los 385.000 kilómetros que nos separan de nuestro satélite implican un retardo en el envío de señales, lo cual impide que un controlador

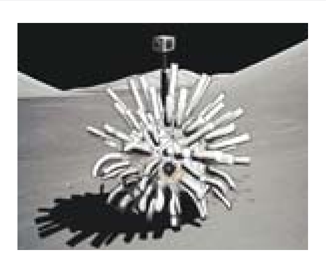
CORTESÍA DEL BARCELONA MOON TEAM (*vehículo explorador del BMT*)



Synergy Moon
Desde la Tierra, los espectadores podrán controlar el vehículo esférico de Synergy Moon mientras explora la Luna con sus cámaras gemelas.



Italia
Italia aún no ha terminado el diseño de su vehículo explorador. Una de las opciones que maneja el equipo es este robot arácnido.



Puli Space
El vehículo explorador de Puli Space, semejante a un erizo marino, recuerda al pelo rizado de la raza canina húngara que da nombre al equipo.



White Label Space
Las ruedas del vehículo explorador de White Label Space están diseñadas para no resbalar sobre la polvorienta superficie lunar.

en la Tierra pueda guiar la nave en tiempo real. Por ello, los equipos informáticos de a bordo deberán conseguir de forma autónoma lo que Armstrong logró manualmente. Un motor de descenso primario frenará la nave cuando se aproxime a la superficie; mientras, pequeños impulsores mantendrán estabilizado el vehículo.

El alunizaje tendrá lugar dos días después del amanecer lunar. Una vez se halle sobre suelo firme, la nave desplegará dos rampas. La segunda servirá como repuesto, en caso de que una roca o un cráter obstruyan la primera. Los pernos que hasta entonces las habrán mantenido plegadas contra la escalera se fragmentarán debido a las altas temperaturas. Una vez que las rampas caigan sobre el terreno, el vehículo explorador se deslizará rodando por una de ellas. Sus ojos binoculares observarán el terreno. El polvo de la Luna es demasiado resbaladizo para permitir una lectura exacta de la distancia recorrida basada en el número de vueltas que darán las ruedas del vehículo. En su lugar, el ordenador calculará la distancia recorrida por el robot a partir de los cambios en la apariencia de la superficie a medida que este se desplaza. Instrumentos especiales protegerán el ordenador de la radiación solar y cósmica que bombardea la Luna, carente de atmósfera.

Desde Pittsburgh, los miembros del equipo de Astrobotic trabajarán en turnos de 24 horas y emplearán una sucesión de imágenes de baja resolución para guiar al *Red Rover* hasta las zonas de interés (incluido, se espera, el lugar de alunizaje de alguna de las misiones Apolo). El vehículo explorador contará con sus propios medios para evitar obstáculos peligrosos. Tiene previsto enviar al menos dos vídeos de alta definición, uno de ellos justo después del alunizaje, a fin de cumplir con los requisitos de la competición. El vehículo también mantendrá contacto mediante mensajes de correo electrónico, en Twitter y en Facebook.

El principal desafío técnico consistirá en garantizar que el *Red Rover* sobreviva a las condiciones extremas de la noche y el día lunares, cada una de las cuales cuenta con una duración de dos semanas terrestres. Durante el día, la temperatura en el lugar de alunizaje previsto puede superar los 120 grados Celsius. Por la noche, desciende hasta los 170 grados bajo cero. Si alguno de los instrumentos, como las baterías, contuviera trazas de agua, esta se congelaría y aumentaría su volumen, lo que provocaría daños irreparables. Hasta ahora, los únicos vehículos que han conseguido sobrevivir a las condiciones extremas de la Luna han sido los exploradores soviéticos por control remoto *Lunojod*, en la década de los setenta. Para conservar la temperatura emplearon un isótopo del polonio, un elemento radiactivo. Sin embargo, Astrobotic y otras empresas privadas que compiten por el premio carecen de acceso a ese tipo de materiales, sometidos a un control muy estricto. Para proteger al *Red Rover* de las altas temperaturas, unas estructuras de fibra de carbono en torno a las baterías disiparán el calor hacia la superficie exterior del vehículo. Por la noche, este hibernará. Se despertará al amanecer para activar sus baterías de fosfato de hierro y litio, comprobadas por Charles Muñoz, estudiante de ingeniería mecánica en Carnegie Mellon. Esa es la clase de innovación barata que pretende inspirar la iniciativa de la Fundación X PRIZE.

COMPETENCIA

Aunque Astrobotic cuenta con grandes posibilidades de triunfar, habrá de hacer frente a una dura competencia. India y Rusia, por ejemplo, patrocinarán de manera conjunta un vehículo explorador, y China se encuentra construyendo un modelo que empleará un radioisótopo para mantenerlo activo durante la noche lunar. Debido a la participación gubernamental, si alguno de estos competidores llegase en primer lugar a la Luna, el premio se reduciría a 15 millones de dólares.

Puede que el equipo mejor financiado de todos sea Moon Express, de Mountain View, que cuenta con el apoyo del multimillonario Naveen Jain y otros inversores. Se sumó a la carrera en 2010, tres años después de que se anunciara el premio. Sin embargo, pretende compensar esa desventaja gracias a una plataforma ya existente desarrollada por la NASA. Otro rival será Next Giant Leap, liderado por Michael Joyce, antiguo piloto de la Fuerza Aérea estadounidense. Su empresa se ha asociado con Draper Laboratory, que diseñó los sistemas de dirección, navegación y control de las misiones Apolo, con un grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts y con la división de sistemas espaciales de Sierra Nevada Corporation. Su equipo trabaja en el diseño de una nave espacial «saltarina» que evitaría la necesidad de un vehículo explorador independiente, pues emplearía los impulsores del alunizaje para recorrer distancias cortas hasta las zonas de interés. La idea se antoja factible, aunque Joyce aún debe lograr financiación.

Los organizadores del Google Lunar X PRIZE esperan que el desarrollo de vehículos exploradores que lleguen hasta la Luna traiga consigo el nacimiento de un nuevo mercado. Astrobotic, por ejemplo, ofrece espacio a bordo de su nave espacial y su vehículo explorador al precio de 1,8 y 2 millones de dólares por kilogramo, respectivamente, con una «cuota de integración» de 250.000 dólares. Para investigadores como Douglas Currie, físico de la Universidad de Maryland, un lugar garantizado a un precio fijo en una misión comercial supondría una gran ayuda. Currie y sus colaboradores desean colocar en la Luna un conjunto de retrorreflectores de luz láser para realizar mediciones cien veces más precisas que las que pueden llevarse a cabo con los que dejaron los astronautas de las misiones Apolo. Pero, para ello, necesitan que alguien los transporte.

A largo plazo, puede que el mayor beneficio de la competición de X PRIZE sea inspirar a una nueva generación de científicos e ingenieros. La carrera por el premio ha imbuido un aire de auténtica emoción al curso universitario que imparte Whittaker. Durante la última semana de clases del año pasado, los miembros del equipo de estructuras de Astrobotic trabajaron sin pausa en el taller del Laboratorio de Robótica Planetaria de Carnegie Mellon, dedicado en su integridad al proyecto del vehículo explorador. Estaban probando el diseño de unos pernos metálicos que se fragmentasen como respuesta al calor para liberar las rampas de la nave, una alternativa a los usuales pernos explosivos. La estudiante de doctorado Kanchi Nayaka instaló, junto a un grupo de universitarios, una cámara de vídeo de alta velocidad en un trípode para grabar la simulación. Los estudiantes accionaron un interruptor y, 17,9 segundos después, el perno se rompió con un estallido, la rampa se abrió y cayó sobre el terreno. «¡Asombroso!», exclamó Nayaka. Se apartó de la cámara y dirigió una sonrisa al visitante: «Nos has traído buena suerte».

PARA SABER MÁS

Aerolíneas espaciales. David H. Freedman en *Investigación y Ciencia*, n.º 413, págs. 74-79, febrero de 2011.
Google Lunar X PRIZE: **www.googlelunarxprize.org**

por Norbert Treitz

Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburg-Essen.



Relojes de sol en Mercurio y la Tierra

Determinar la hora a partir de la posición del Sol resulta complicado en un planeta cuyo movimiento de rotación no es mucho más rápido que su desplazamiento orbital

Mercurio es el menor de los planetas del sistema solar y también el más cercano al Sol. Debido a su gran proximidad al astro, desde la Tierra solo se muestra al ojo desnudo en su momento de máxima elongación, cuando su separación angular con el Sol es máxima. (La próxima máxima elongación occidental de Mercurio tendrá lugar el 16 de agosto de 2012; la oriental, el 26 de octubre.)

Nuestro planeta más veloz posee un tamaño algo menor —aunque no es más ligero— que los mayores satélites del sistema solar: Ganímedes (de Júpiter) y Titán (de Saturno). Además, su trayectoria traza la órbita más excéntrica de todos los planetas del sistema solar. Aun así, la geometría elíptica apenas se aprecia como tal, ya que la diferencia entre el eje mayor y el menor de la elipse apenas asciende al 2 por ciento. El Sol se sitúa en uno de los focos de esa elipse, a una distancia del centro igual a un quinto del eje mayor. En consecuencia, durante el afelio (el punto de la órbita más distante del Sol) el planeta se encuentra una vez y media más alejado del Sol que en el perihelio (el momento de máxima cercanía al astro).

En lo que respecta a su velocidad angular, la diferencia entre ambos puntos resulta aún más drástica. Mercurio no solo alcanza en el perihelio su mayor velocidad orbital, sino que, debido a su cercanía al Sol, describe un gran ángulo por unidad de tiempo: en el perihelio, su velocidad angular asciende a 1,53 veces el valor medio; en el afelio, a 0,68 veces dicho valor.

A diferencia de Venus [*véase* «Veladas venusianas a la luz de la Tierra»; por N. Treitz; Investigación y Ciencia, marzo de 2012], Mercurio rota sobre su eje en el mismo sentido que la mayoría de los planetas: en sentido antihorario, según se vería desde el hemisferio norte solar. Al igual que en el caso del planeta vecino, su rotación y período orbital se hallan sincronizados: Mercurio completa una vuelta sobre su eje en 2/3 del año mercuriano (88 días terrestres), unos 58 días en nuestro planeta. La diferencia entre las velocidades angulares medias del movimiento de rotación y el de traslación puede calcularse con facilidad empleando como unidades el número de vueltas completas por año mercuriano: 3/2 − 1 = 1/2. Por tanto, el día solar medio en Mercurio dura el doble que el año sideral.

Un mediodía caluroso

Debido a su desplazamiento orbital, también en la Tierra el día solar se prolonga durante algo más de lo que cabría esperar a partir de su velocidad de rotación: mientras que las estrellas vuelven a aparecer en el mismo punto del cielo tras 23 horas, 56 minutos y 4 segundos para un observador terrestre fijo, el Sol recupera su posición del día anterior unos 236 segundos más tarde, de media. Este efecto se muestra más acentuado en Mercurio debido a que su rotación procede con mucha mayor lentitud. Entre un amanecer y el siguiente transcurren dos años mercurianos, unos 176 días terrestres.

Pero el movimiento de traslación de Mercurio adquiere tal velocidad en el perihelio que no solo contrarresta el efecto de la rotación, sino que provoca que el Sol se detenga en el cielo del pequeño planeta. Ello sucederá cuando su velocidad angular ascienda a 3/2 del valor de la velocidad media. Puesto que en el perihelio la velocidad angular orbital llega hasta 1,53 veces el valor medio, el Sol no solo se detiene, sino que llega a retroceder por un momento. Eso sucederá una vez por período orbital y, por tanto, dos veces por día solar mercuriano, a la hora del mediodía en dos meridianos antipódicos que irán alternándose. Allí el Sol alcanza su punto más alto en el cielo. Pero, para un habitante de Mercurio, el astro sobre su cabeza se encuentra entonces más cercano que nunca y se desplaza mucho más despacio que en cualquier otro momento: de

EXCENTRICIDAD Y LEYES DE KEPLER

Como ya se encargara Kepler de ocultar más que de aclarar en su *Astronomia Nova*, un planeta describe, en el sistema de referencia en el que el centro de masas se encuentra en reposo, una órbita elíptica en uno de cuyos focos se sitúa dicho centro de masas. En promedio temporal, este coincide con la posición del Sol (si bien no con total exactitud, debido a la influencia de los planetas de mayor tamaño). Si denotamos la longitud de los semiejes mayor y menor de la elipse por a y b, la desviación con respecto a una órbita circular puede cuantificarse por medio de la excentricidad de la órbita:

$$e = \sqrt{a^2 - b^2}.$$

La velocidad angular media de la órbita viene dada por $\omega_m = 2\pi/T$, donde T es el período. En los ápsides de la elipse (el perihelio y el afelio) esa velocidad alcanza los valores extremos dados por:

$$\omega_p = \omega_m \sqrt{(1 + e/a)/(1 - e/a)^3},$$

$$\omega_a = \omega_m \sqrt{(1 - e/a)/(1 + e/a)^3}.$$

Cuando e es mucho menor que a, dichas expresiones pueden aproximarse por:

$$\omega_p = \omega_m (1 + 2e/a),$$

$$\omega_a = \omega_m (1 - 2e/a).$$

hecho, se detiene y efectúa un ligero retroceso. No deben extrañarnos, por tanto, las altas temperaturas que pueden alcanzarse en dichas zonas. No en vano, una de las cuencas que se encuentran sobre uno de esos dos meridianos ha sido bautizada con el nombre de Caloris.

En los meridianos del planeta situados 90 grados hacia el este o el oeste de Caloris, la parada y el retroceso del Sol suceden al amanecer y en el ocaso: allí el Sol sale dos veces, separadas por un pequeño lapso de tiempo y un ligero retroceso intermedio. Del mismo modo, al atardecer se pone dos veces. Todo un comportamiento dubitativo por parte del Sol con el heraldo de los dioses.

En honor a la exactitud, debemos reconocer que el período orbital de Mercurio no dura 1/4 años terrestres, sino 0,24. Venus da 2 vueltas en torno al Sol en el tiempo en que Mercurio completa 5 órbitas. Dado que la relación análoga entre la Tierra y Venus asciende a 13/8, podemos concluir que entre las órbitas de Mercurio y la Tierra existe una «resonancia» de 16/65, o —si esta fuese exacta— cada 0,246 años. Por lo tanto, podemos decir que nuestros tres planetas interiores se encuentran bellamente sincronizados. Es una pena que los pitagóricos no supiesen medir las rotaciones planetarias. Hubieran disfrutado sobremanera en caso de observar tal cantidad de comportamientos regidos por números enteros pequeños.

Relojes de sol

Como consecuencia de ese andar indeciso del astro rey, la manecilla principal de un reloj solar en Mercurio se detendría dos veces al día e incluso retrocedería un poco. Algo que no se corresponde precisamente con el comportamiento que esperamos de un reloj.

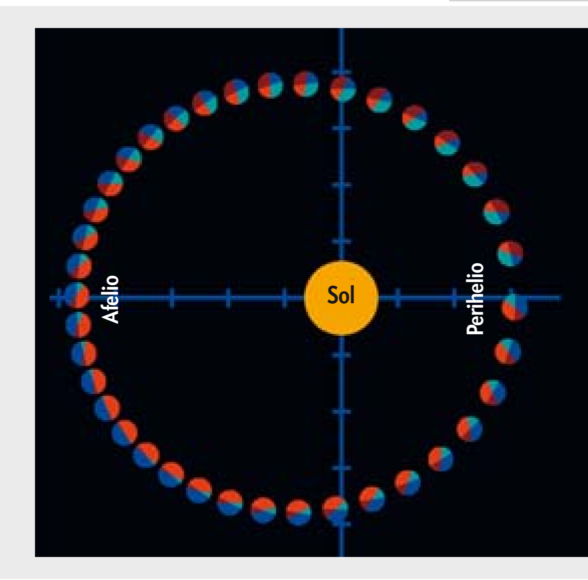
Pero ¿qué sucede en la Tierra? Por lo general, suele distinguirse entre la hora que indica un reloj solar, a la que curiosamente suele denominarse *hora local real*, y la *hora local media* corregida. (Lo que el comandante de un vuelo suele indicarnos como «hora local» se refiere a la hora oficial en el aeropuerto de destino.) Los relojeros distinguen entre la *desviación* y la *deriva* del reloj para referirse, respectivamente, a la diferencia horaria y al desfase de su velocidad frente a los valores considerados correctos.

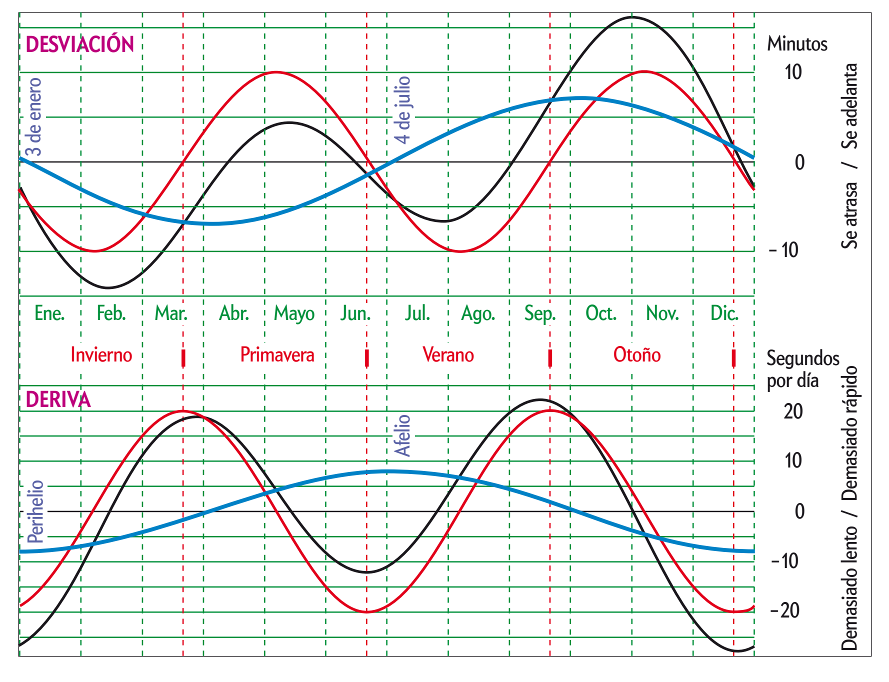
La Tierra rota con una marcada regularidad de 365,256 vueltas sobre su eje al año, tiempo en el que completa una órbita alrededor del Sol. Sin embargo, su movimiento no muestra tanta uniformidad como podría pensarse: la órbita terrestre posee una excentricidad dada por $e/a = 1/60$, lo que implica que su velocidad angular en el perihelio resulta aproximadamente un 1/30 mayor que la media y, en el afelio, un 1/30 menor.

Debido al movimiento orbital de la Tierra, el día solar (el tiempo que, visto desde la Tierra, tarda el Sol en volver a ocupar el mismo lugar en el cielo) dura en promedio 236 segundos más que el día sideral (el medido con respecto a las estrellas). Cerca del perihelio, sin embargo, el Sol avanza en el cielo un 3 por ciento más rápido, por lo que solo regresará a la misma posición cuando el «exceso» en la rotación de nuestro planeta supere en un 3 por ciento los 236 segundos

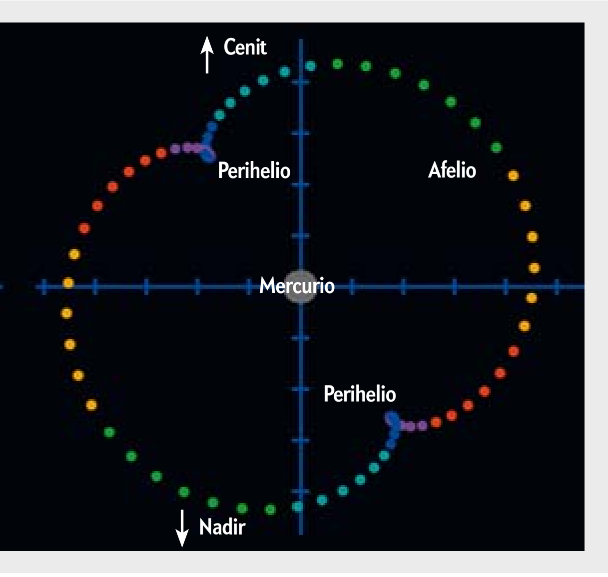
EL EXCÉNTRICO COMPORTAMIENTO DE MERCURIO

La imagen izquierda ilustra uno de los dos períodos orbitales siderales de Mercurio en el sistema inercial copernicano. Para mostrar la rotación del planeta, este aparece representado como si uno de sus hemisferios fuese rojo y el otro azul. La cara diurna se indica mediante un color más claro que la nocturna. Tras un período orbital completo, el planeta ha rotado +3/2 veces: es decir, ambos hemisferios han invertido sus orientaciones con respecto al Sol (obsérvese la orientación del planeta en el perihelio). Las distintas representaciones de Mercurio se corresponderían con «instantáneas» tomadas a intervalos de tiempo constantes.





Desviación y deriva de un reloj solar en la Tierra como funciones de los días del año. En azul se muestran los desfases debidos a la excentricidad de la órbita terrestre; en rojo, los originados por la inclinación del eje de rotación con respecto al de la órbita. En negro se muestra la suma de ambos efectos.



En el sistema de referencia del horizonte para un punto elegido al azar sobre el ecuador, el recorrido del Sol en Mercurio sería el que muestra esta imagen. Para una excentricidad dada por *e/a* = 0,2, ese recorrido se asemeja a una nefroide con puntas (lazos, para ser más precisos) que se orientan hacia el interior en los momentos en los que el Sol «se detiene» (cuando se encuentra más próximo al planeta). Las imágenes del Sol se muestran en seis colores por cada período sideral. Todas ellas guardan una misma distancia temporal entre sí, la cual coincide con los intervalos temporales de la imagen de la izquierda.

habituales. Ese día solar durará, por tanto, unos 236 × 0,03 ≈ 7 segundos más que los 86.400 usuales. Es decir, experimentaremos una deriva de reloj de unos 7 segundos al día. Medio año más tarde obtendremos el mismo resultado, pero con signo opuesto. Cada seis meses, esas derivas llegan a sumar una desviación de hasta 7 minutos con uno y otro signo, los cuales, por definición, se cancelan al término del año.

La desviación de un reloj de sol con respecto al tiempo solar medio que tradicionalmente ha recibido el curioso nombre de «ecuación de tiempo», comprende otro factor de periodicidad semestral. Este se debe a la inclinación del eje terrestre con respecto al plano de su órbita, circunstancia a la que, como sabemos, debemos agradecer la existencia de estaciones.

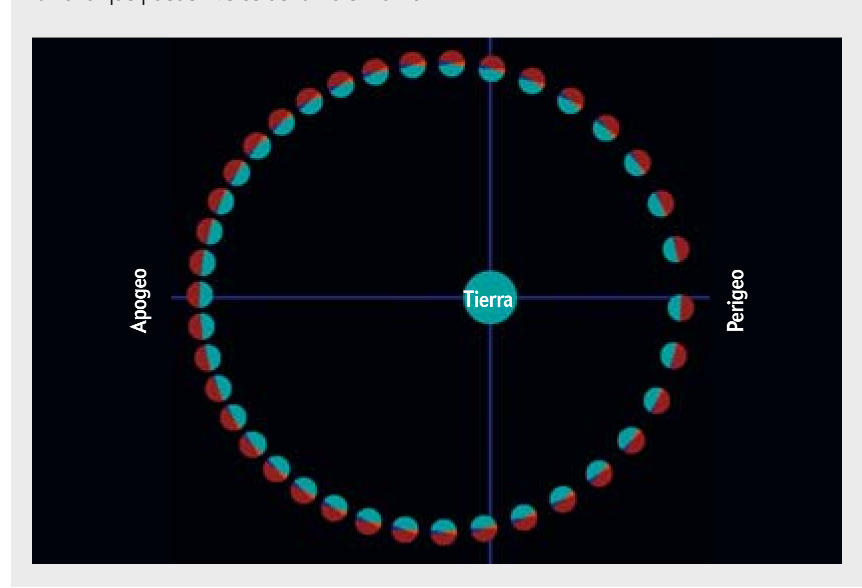
El punto subsolar sobre la Tierra (aquel desde el cual el Sol se ve brillar en el cenit) cambia a lo largo del año: describe un círculo máximo que pasa por ambos trópicos y que corta el ecuador con un ángulo de 23,5 grados. En ese punto, la velocidad a la que se desplaza su longitud geográfica se ve alterada por un factor igual a cos(23,5°) = 0,917; es decir, es en torno a un 8 por ciento más lenta. Cuando corta los trópicos, ese desplazamiento resulta un 8 por ciento más rápido. Esto añade a los equinoccios una deriva del 8 por ciento de 236 segundos (unos 20 segundos) al día y, a comienzos del verano e invierno, los mismos valores en la dirección opuesta. Sin embargo, las desviaciones acumuladas, al tratarse de un período la mitad de largo que en el caso anterior, no resultan de tanta magnitud como cabría pensar: no pasan de 10 minutos. Es decir, en el peor de los casos, un reloj solar errará la hora en un cuarto de hora como máximo.

Si en vez de una vara usamos una punta para generar la sombra, podremos encontrar escalas adaptadas a los distintos días del año que nos permitirán calcular el tiempo solar medio a partir del tiempo solar aparente... siempre y cuando el cielo se encuentre despejado y sepamos en qué día del año estamos.

De todos es conocido que la Luna rota exactamente una vez por período orbital (rotación sincrónica) como resultado del acoplamiento de las fuerzas de marea. Si su eje de rotación fuese paralelo al de su órbita y esta describiera un círculo perfecto, desde la Tierra observaríamos una semiesfera lunar exacta. Sin embargo, a lo largo del mes da la sensación de que la Luna oscila ligeramente (movimientos de libración), lo que nos permite ver un área algo mayor que la de un hemisferio. Una de las causas para ello coincide con uno de los fenómenos que impiden que un reloj solar dé la hora exacta: la leve inclinación del eje de rotación de la Luna con respecto al de su órbita (no con respecto al de la Tierra). Ello induce un movimiento conocido como libración en latitud, el cual nos permite atisbar de manera periódica los polos de nuestro satélite.

LIBRACIÓN EN LONGITUD DE LA LUNA

La excentricidad de la órbita (geocéntrica) lunar viene dada por *e/a* = 0,055, lo que implica que la velocidad angular del período orbital a lo largo de un mes llega a variar hasta un 11 por ciento con respecto a la media. Esta figura muestra cómo sería la libración en longitud si la excentricidad de la órbita lunar fuese igual a la de la órbita de Mercurio: *e/a* = 0,2. Los colores azul y rojo marcan las semiesferas que durante el perigeo y el apogeo quedan enfrentadas u opuestas a la Tierra, respectivamente. Los tonos claros y oscuros no simbolizan la parte iluminada por el Sol, sino el hemisferio que en cada momento se halla enfrentado a la Tierra o de espaldas a ella. En rojo claro se indican las regiones de la cara oculta de la Luna que pueden verse de tanto en tanto.



por Agustín Rayo



Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.

La paradoja de los dos sobres

Un misterio probabilístico

«¡Se regala dinero!» rezaba un cartel que había aparecido de repente en la plaza del pueblo. Al lado del cartel se encontraba sentado un hombre de traje blanco. Frente a él había una pequeña mesa y, sobre ella, dos sobres. «¿Qué broma es esta?», piensa usted. ¿Quién podría estar regalando dinero?

Unos días después, sin embargo, una amiga le asegura que no se trata de ningún engaño. El hombre de traje blanco es un forastero que, efectivamente, se encuentra dispuesto a regalar dinero a todo aquel que desee participar en un juego muy sencillo. «¡Algún truco habrá!», replica usted. Pero al final le puede la curiosidad: «¿Cómo funciona eso de los dos sobres?», pregunta a su amiga. «Es muy sencillo», responde ella. «El hombre ha introducido un cheque en cada uno de los sobres. Nadie sabe cuánto dinero contiene cada uno, porque los cambia cada día, pero el forastero nos ha explicado el método que utiliza para extender los cheques. Uno de ellos contiene n euros, donde n es un número natural elegido totalmente al azar. El otro contiene el doble, $2n$ euros. Por desgracia, es imposible saber dónde se encuentra el cheque de mayor valor.»

«¿Y eso es todo?», pregunta usted. «Sí», responde su amiga. «Lo único que debe hacer el participante es elegir uno de los dos sobres y el cheque que encuentre dentro será suyo. Yo participé la semana pasada y en el sobre que escogí hallé un cheque por valor de 524.288 euros. Lo deposité en el banco sin problema y ahora estoy pensando en comprarme un piso ¡Lástima que solo se pueda jugar una vez!»

Ante semejante noticia, usted decide visitar al hombre de traje blanco. «¡Buenos días!», le saluda él con una sonrisa. «¡Escoja uno de los dos sobres y el cheque que encuentre será suyo!» Después de titubear un momento, usted se decide por el sobre de la izquierda. ¡Lo bien que le vendría cambiar de piso!

«Un momento», le interrumpe el forastero justo antes de que usted se disponga a abrir el sobre: «¿Le interesan las matemáticas?». «Pues... sí», responde usted, «¿cómo lo supo?». «¡Ah! En ese caso, le concederé un trato especial. Usted ha elegido el sobre de la izquierda. Pero voy a concederle la posibilidad de cambiar de opinión y quedarse con el de la derecha, si así lo prefiere. Piénselo bien, podría convenirle», añade con una sonrisa.

Tras dudar un momento, usted se percata de que, en efecto, la propuesta no carece de interés. Aunque todavía no ha abierto el sobre de la izquierda, sabe que este contiene cierta cantidad de dinero: digamos, k euros. Si k fuese impar, no cabría duda de que le convendría cambiar de sobre, dado que entonces podría asegurar que el de la derecha contiene $2k$ euros.

¿Y si k fuese un número par? En ese caso, el sobre de la derecha podría contener $2k$ euros, pero también $k/2$ euros. Ambas posibilidades cuentan con la misma probabilidad, ya que sabemos que el número inicial n ha de ser igual a k o a $k/2$, y estas dos opciones deberían ser igual de probables puesto que n fue elegido al azar. Si cambia de sobre, por tanto, su situación mejorará o empeorará con igual probabilidad; pero, si mejora, sumará k euros a la cantidad actual, mientras que, si empeora, solo perderá $k/2$ euros. Véalo así: cambiar de sobre resulta equivalente a lanzar una moneda y ganar k euros si cae cara, pero perder solo $k/2$ si sale cruz. ¡Hay que tirar esa moneda!

Se encuentra usted ante la siguiente situación: si el número k es impar, le conviene cambiar de sobre, ya que entonces recibirá el doble de dinero. Y si k es par,



también le conviene cambiar de sobre, ya que esa decisión equivaldría a lanzar una moneda al aire y beneficiarse de la oportunidad de ganar más dinero si cae cara del que podría perder si sale cruz.

«¡Muy bien!», resuelve usted por fin. «¡Cambio de sobre!» Con la mano temblorosa, retorna a su lugar el sobre de la izquierda, aún cerrado, y toma el de la derecha. Una vez más, se prepara para abrirlo... «Disculpe», le interrumpe de nuevo el caballero: «¿No cree que quizá desearía volver a cambiar de sobre? Podría convenirle».

En ese momento advierte usted el problema. El mismo razonamiento que le llevó a cambiar de sobre la primera vez podría emplearse de nuevo, con lo que debería volver a tomar el de la izquierda. ¿Qué ha ocurrido?

Nos encontramos ante una paradoja. Disponemos de un argumento, en apariencia válido, de acuerdo con el cual siempre deberíamos cambiar de sobre, *con independencia de cuál de ellos hayamos elegido*. Y esa conclusión no puede ser correcta, dado que nos obligaría a cambiar de opinión una y otra vez de manera indefinida.

Distribuciones imposibles

¿Dónde nos hemos equivocado? La primera vez que escuché la paradoja, hace ya muchos años, no la encontré demasiado interesante. Después de pensarlo un poco, concluí que el problema se basaba en un requisito imposible de satisfacer: que el hombre de traje blanco dispone de un método para elegir números naturales que le permite seleccionar un número dado con igual probabilidad que cualquier otro.

Para entender por qué algo así es imposible, considere el siguiente método aleatorio para seleccionar números naturales: lanzar una moneda hasta que obtengamos una cara. Si la moneda cae cara en el primer lanzamiento, elegiremos el número 1; si obtenemos una cara en el segundo, elegiremos el número 2, y así sucesivamente. (Si la moneda nunca cae cara, elegiremos el cero.) De esta manera, la probabilidad de escoger el número 1 sería 1/2; la probabilidad de seleccionar el 2, 1/4; el 3, 1/8, etcétera. En general, la probabilidad de escoger el número k vendría dada por $1/2^k$ (a menos que k sea cero, en cuyo caso la probabilidad de escoger k es cero).

Pero ese método no asigna a todos los números naturales la misma probabilidad, por lo que no proporciona una manera para escoger números «totalmente al azar». Sin embargo, posee la propiedad de que las probabilidades asignadas a cada uno de los números naturales suman uno, puesto que:

$$1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + \cdots = 1.$$

Esta propiedad constituye un requisito indispensable. Sin ella, jamás podríamos tener una distribución de probabilidad en el sentido estándar.

La manera más sencilla de verificar que no puede haber un método aleatorio que genere números naturales con igual probabilidad para todos ellos consiste en observar que dicho método violaría la propiedad anterior. Si la probabilidad de elegir un número dado fuese cero, tendríamos que $0 + 0 + 0 + \cdots = 0$. Y si la probabilidad de elegir un número dado tomase cualquier otro valor $r > 0$, obtendríamos que $r + r + r + \cdots = \infty$.

Mi primera reacción ante la paradoja fue, por tanto, que esta no es tal, pues presupone una distribución uniforme de probabilidades sobre los números naturales, lo cual carece de sentido.

La paradoja persiste

Pero ¿por qué no emplear una distribución no uniforme de probabilidades? ¿Qué sucedería si, por ejemplo, el hombre de traje blanco escogiese el número inicial n utilizando el método de la moneda? Aunque dicho procedimiento no genere una distribución uniforme, se trata, después de todo, de un método aleatorio.

El problema reside en que, con el método de la moneda, no siempre contaríamos con un buen argumento para cambiar de sobre. Supongamos que el sobre de la izquierda contiene un cheque por 8 euros. ¿Le convendría decidirse por el de la derecha? Existen dos posibilidades: que el número inicial n haya sido 8 (y, por tanto, que el sobre de la derecha contenga 16 euros), o que n haya sido 4 (y que el sobre de la derecha contenga 4 euros). Pero ahora estas dos posibilidades ya no son igualmente probables. La probabilidad de que el número inicial sea bien 4 o bien 8 viene dada por:

$$P(n = 4, 8) = 1/2^4 + 1/2^8 = 17/256.$$

Por tanto, bajo el supuesto de que el número inicial es $n = 4$ o $n = 8$, la probabilidad de que n sea igual a 4 resulta:

$$P(n = 4 \mid n = 4, 8) = \frac{1/2^4}{17/256} = 16/17,$$

mientras que la probabilidad de que n sea 8 viene dada por:

$$P(n = 8 \mid n = 4, 8) = \frac{1/2^8}{17/256} = 1/17.$$

Vemos, pues, que la probabilidad de que el sobre de la derecha contenga 4 euros supera con mucho a la probabilidad de que contenga 16 euros. En consecuencia, ahora no le conviene en absoluto cambiar de sobre. Aunque todavía existe la posibilidad de acabar con 8 euros más de los que ya posee, la probabilidad de perder dinero resulta mucho mayor que la de ganar. En términos técnicos, el *valor esperado* de cambiar el sobre es:

$$16/17 \times 4 + 1/17 \times 16 \approx 4{,}7.$$

Y esa cantidad de dinero resulta bastante inferior al valor esperado de no cambiar de sobre: 8 euros.

Después de haber llevado a cabo ese razonamiento me quedé más tranquilo: seguramente, la paradoja se apoyaba en una distribución uniforme de probabilidades. Sin ella, la paradoja se desvanece.

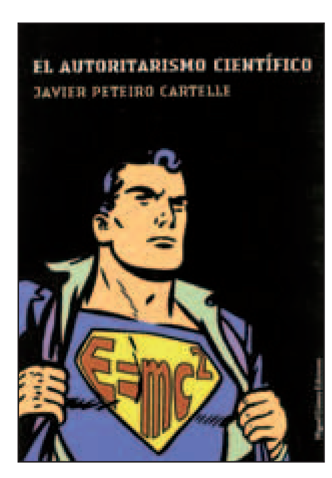
Sin embargo, estaba equivocado. Existen distribuciones de probabilidad no uniformes que, a pesar de todo, implican que el valor esperado de cambiar de sobre es siempre mayor que el de no hacerlo.

He aquí un método para generar una distribución tal. Tome un dado de seis caras y tírelo hasta que obtenga un 1 o un 2. Si eso sucede en el primer lanzamiento, elija el número 1; si ocurre en el segundo, escoja el número 2; se ha de esperar hasta el tercero, seleccione el número 4; etcétera. En general, si aparece un 1 o un 2 en el lanzamiento k-ésimo, elija el número $2^{(k-1)}$. Es posible demostrar que, si el hombre del traje blanco emplea este método para determinar el número inicial, el valor esperado de cambiar de sobre es siempre mayor que el dinero que contiene el sobre escogido en primer lugar.

¡No nos hemos librado de la paradoja, después de todo!

PARA SABER MÁS

Una explicación sobre por qué el problema de los dos sobres no es tan sencillo como parece se encuentra en el artículo **The two-envelope paradox**, de John Broome. Fue publicado en enero de 1995 en *Analysis*, vol. 55, n.º 1, págs. 6-11.



EL AUTORITARISMO CIENTÍFICO,

por Javier Peteiro Cartelle. Miguel Gómez Ediciones, colección Ítaca. Málaga, 2010.

Crítica al transhumanismo

Una crítica radical de la ciencia y de las pseudociencias como ideologías reduccionistas, desde una posición científica irreprochable

«Caminamos hacia una sociedad de enfermos» fue el titular con que la polémica sección «La contra» del diario *La Vanguardia* del 19 de marzo de 2011 encabezó la entrevista a Javier Peteiro Cartelle. Sus argumentos son críticos contra la deshumanización de la medicina, contra la medicalización de toda disfunción, contra la reducción de todo acto humano como derivado de la acción de una hormona, contra el determinismo genético.

Autor de *El autoritarismo científico*, Peteiro es un científico que no cree en la ciencia, y tomo el término *creer* en su sentido literal. Doctor en medicina y jefe de la sección de bioquímica del Complejo Hospitalario Universitario de La Coruña, no asume la ciencia como una fe, y opina que la ciencia no ha de convertirse en la única explicación del mundo, de sus fenómenos, de sus estructuras, de sus organismos, ni de las personas con sus reacciones, sus sensaciones, sus sentimientos y sus creencias.

De forma impecable, concreta y documentada, describe en este libro los diversos aspectos que relacionan la ciencia y la sociedad. Empieza con una sucinta visión del itinerario histórico que ha seguido la ciencia, hasta cristalizar en el método científico basado en la experimentación. Presenta de forma clara algunos problemas inherentes a la teorización en biología: la definición de lo que sea la vida, el problema de la consciencia del individuo, sea este una célula, un organismo o una especie. Y termina con una valiente conclusión, que es también una declaración de principios: «La Ciencia no es ni será nunca omnisciente. (...) El Ser nunca nos dirá todo a través de la Ciencia, sino que se reservará siempre algo».

En el segundo capítulo critica de forma implacable las pseudociencias. Comienza con una denuncia de la homeopatía como anacronismo dogmático, sigue con la crítica del uso falaz de términos científicos quizás incomprendidos por sus usuarios y añade unos inteligentes comentarios sobre el atractivo de las pseudociencias precisamente por su irracionalidad. Cierra esta parte con una reflexión sobre el carácter histórico de la ciencia como actividad humana, y sobre la dificultad de definir qué es la ciencia con el propósito de que no se cuele una pseudociencia en la definición. Finaliza con el postulado cientificista básico, que critica: visto el éxito de la ciencia en la explicación del mundo, «la Ciencia lo sabrá todo y desde ella todo será modificable». Atribuye el éxito de dicho postulado entre los científicos y entre la población en general a la actitud de los divulgadores, entre los que cita explícitamente a Penrose, Sagan, Dawkins o Tipler, señalando alguno de sus errores o sus interpretaciones, que califica de abusivas. En un final sorprendente, analiza el término *teoría*, y termina el capítulo echando un capote al psicoanálisis, al que califica de «teoría de la subjetividad difícilmente contrastable con métodos empíricos» pero no reducible a la aproximación neurobiológica. Se apoya para ello en la opinión de Kandel, nóbel de Medicina en 2000 y neurobiólogo a su vez. Peteiro, que sigue en su vida profesional los postulados psicoanalistas, profusamente criticados por poco científicos, parece en este punto algo menos implacable que en el resto del libro.

El tercer capítulo («Cientificismo y sujeto») carga contra el reduccionismo metodológico de unas ciencias a otras, y, en especial, contra la reducción del enfermo a su enfermedad. Esto es, la reducción del papel del médico al de medidor de parámetros biológicos y diagnosticador por la imagen. Describe la creciente tendencia a normativizar enfermedades mediante protocolos y se centra sobre todo en el problema de la taxonomización de enfermedades psiquiátricas, con abundantes ejemplos de abusos de la terminología, del diagnóstico y de los tratamientos consiguientes. De ahí extrapola a la creciente —y en su opinión excesiva— importancia del diagnóstico genético en la detección de enfermedades actuales o futuras, o a la abusiva importancia que se da a la influencia —casi determinista, según el autor— de las hormonas en el comportamiento humano. Explora también el problema de Dios y de la religión, desde un doble planteamiento. Expone argumentos ortodoxos contrarios a la teoría creacionista y al diseño inteligente, presentados como pseudociencias. Y plantea asimismo la incorrección de reducir el ser humano a un mero portador de genes, casi determinado en su comportamiento y creencias.

Aborda a continuación el tema del producto científico: descubrimiento, invención, invento, patente. El problema de la patentabilidad de genes, de organismos o de secuencias de genoma le lleva a criticar el comportamiento de las compañías farmacéuticas, a las que denuncia como provocadoras básicas de difundir el modelo de individuo consumidor de fármacos y de cirugía plástica. Destaca que la medicina basada en indicaciones, que obviamente no discute, adolece de lagunas metodológicas diversas. Detalla los límites éticos de los ensayos clínicos con humanos o el uso de placebos y presenta algunos ejemplos de transgresión de esos límites, para mostrar las dificultades que entraña la gestión de los resultados de la investigación cuando esta tiene una finalidad comercial. Añade también comentarios muy pertinentes acerca del producto científico bibliográfico, en especial los artículos científicos. Muestra la dificultad de mantener un sistema de evaluación crítica de las publicaciones en un mundo comunicativo mucho más abierto y rápido que antes. Y termina con una frase de Craig Venter, líder de diversas iniciativas sobre la secuenciación del genoma y la síntesis de la vida: «Intentaremos crear un nuevo sistema de valores para la vida. Al tratar a esta escala, no se puede esperar que todo el mundo esté contento». En la opinión de Peteiro, «la Ciencia sirve para realizar lo posible y venderlo».

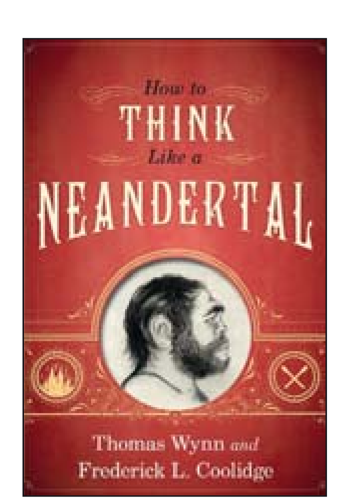
El concepto de proyecto científico le permite comentar brevemente el papel del azar en el desarrollo científico y la aparición histórica de la tecnociencia. Critica la financiación de proyectos con

objetivos demasiado definidos —al menos en el campo de las ciencias biosanitarias—. Considera que ello responde a una actitud metodológicamente anticientífica, pues los grandes avances e ideas revolucionarias han aparecido como mutaciones de ideas clásicas; no se fomentará ese progreso si se constriñen demasiado los programas científicos. La serendipia desempeña su papel en el desarrollo científico, y no un papel anecdótico sino fundamental.

Un último capítulo («Ciencia y poder») le conduce a la crítica fundamental del libro. En su opinión, la ciencia se ha convertido en una autoridad con voz y voto en la política, en el ocio, en la comunicación, en la salud, en la justicia (pruebas genéticas, peritajes psiquiátricos) o en el sistema de creencias. El método científico se aplica a todos los campos, propios e impropios, hasta llegar a planteamientos radicalmente rompedores. Ejemplos de propuestas *transhumanistas* o *singularitaristas,* como la investigación en inmortalidad, la reconstrucción de cerebros por ingeniería inversa o nuevos cuerpos clonados, dan pie al autor a reflexionar sobre hacia dónde nos llevan, como especie, tales iniciativas. La integración de lo nano, lo bio, las tecnologías de la información y la ciencia cognitiva (neurociencias), en su acrónimo NBIC, configura el mundo del futuro: «Si Cogno puede pensarlo, Nano puede construirlo, Bio puede mejorarlo e Info puede controlarlo». Un mundo feliz, que, en opinión de Peteiro, deja fuera buena parte de lo esencial del ser humano y de la humanidad, de la cultura, de los sentimientos y emociones, que no serán —cree— absolutamente reducibles a parámetros científicos. De la máxima de Quilón de Esparta «conócete a ti mismo», comenta que «la Ciencia es un medio, pero no el único ni mucho menos el más importante (...). Hacer de la ciencia la única noticia equivale a caer en la ignorancia más brutal».

Estimulante y polémico.

—Claudi Mans
Universidad de Barcelona



HOW TO THINK LIKE A NEANDERTAL,

por Thomas Wynn y Frederich L. Coolidge. Oxford University Press; Nueva York, 2012.

Los neandertales desde su propio punto de vista

Un nuevo libro intenta entender la visión del mundo de estos humanos extinguidos

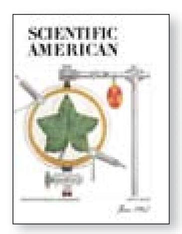
Más de siglo y medio después de su descubrimiento, ¿qué puede aportar de novedoso un libro sobre neandertales? Thomas Wynn y Frederick L. Coolidge, expertos en evolución cognitiva y neuropsicología de la Universidad de Colorado, han escrito un libro que trata de proporcionar una imagen plausible de cómo eran, sentían, pensaban y se relacionaban entre sí los neandertales. Para ello emplean desde datos del registro arqueológico hasta comparaciones con grupos cazadores-recolectores actuales e incluso algunas deducciones altamente especulativas, algo quizás inevitable cuando se trata de conocer rasgos del comportamiento que no dejarán huella en el registro fósil. En un lenguaje muy asequible y libre de términos técnicos, los autores profundizan en aspectos como la organización social y familiar en pequeños grupos muy móviles, la escasa división por sexos en las estrategias de caza, la fuerte dependencia de la memoria a largo plazo o la existencia de algún tipo de lenguaje, quizá sin sintaxis o sin gramática. Después de este recorrido, presentan un listado con posibles rasgos de la personalidad de los neandertales, entre los que encontramos el pragmatismo, el estoicismo, la bravura, la caridad, la frialdad, el conservadurismo y la falta de flexibilidad y de imaginación. Algunos de estos rasgos se utilizan para contrastarlos con los nuestros y proponer algunas diferencias en nuestra forma de ser, más inventiva y dinámica, y más capaz de adaptarse a los cambios. Estas diferencias, proponen, pueden estar en la base de su extinción después de la llegada de los *Homo sapiens* a Europa hace 45.000 años.

Pero los componentes subjetivos de la visión de los autores se ponen de manifiesto en algunas secciones del libro. Por ejemplo, mantienen que hay pocos elementos en el registro arqueológico neandertal que tengan un obvio contenido simbólico, a pesar de los clásicos ejemplos de enterramientos intencionales y de los recientes descubrimientos de elementos decorativos como pigmentos, collares, plumas de aves, garras de rapaces, conchas decoradas, etcétera. Simplemente, minusvaloran la mayoría y descartan o ignoran algunos otros datos. De esta forma, Wynn y Coolidge deciden alinearse en el bando de los que consideran a los neandertales cognitivamente inferiores a los humanos modernos. Pero este posicionamiento, por otra parte lícito, no se lleva a cabo de forma explícita, sino que debe deducirlo el lector crítico leyendo entre líneas.

Otro aspecto discutible del libro es su aparente desconocimiento de la ciencia actualmente más dinámica sobre los neandertales: la paleogenética. Para Wynn y Coolidge, los hallazgos en este campo (el genoma neandertal y secuencias de ADN de un par de docenas de individuos) no parecen ser una fuente muy útil de información, ya que, según ellos, no se conocen los genes para rasgos como la anchura de la nariz o la robustez craneal —no entendemos la relevancia otorgada a dichos rasgos en el contexto de un libro que trata sobre la cognición, no sobre la morfología—. Esta, digamos, conmovedora ignorancia científica, arroja una cierta sombra de duda sobre la solidez de un trabajo que por lo demás ofrece una lectura fácil y entretenida.

—Carles Lalueza Fox
Instituto de Biología Evolutiva
CSIC-UPF

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Junio 1962

De Babbage a Google

«La posibilidad de utilizar máquinas como la computadora digital para resolver el doble reto de la traducción mecánica y la recuperación de información ha empujado a un número creciente de profesionales a considerar nuevos puntos de vista sobre el lenguaje. Si pudiéramos perfeccionar una máquina traductora, habríamos dado un paso de gigante hacia la eliminación de las barreras lingüísticas. Si lográramos crear una máquina que recuperara información, tendríamos mucho más a mano el conocimiento acumulado en todas las bibliotecas del mundo.»

Imanes y plasmas

«Los imanes semiconductores despiertan especial interés en el campo de la generación de energía, no solo en magnetohidrodinámica, sino también en la fusión nuclear controlada. Esta última es una de las aplicaciones más atrayentes y con mayores posibilidades. Hay que resolver no pocos problemas antes de que la energía de fusión se convierta en una realidad práctica. Uno de ellos lo plantea el confinamiento de los gases ionizados calientes, o plasma, en algún tipo de recipiente. Como la temperatura de los plasmas es del orden de los 100 millones de grados centígrados, no hay material capaz de encerrarlos. Pero sí pueden confinarse merced a la fuerza de un campo magnético. Actualmente se piensa que los semiconductores podrían generar esos campos.»

Junio 1912

Amortiguador hidráulico

«El último obstáculo que George Westinghouse ha convertido en éxito es la ballesta neumática para automóviles. Cierto día, unos residentes del norte del Estado de Nueva York le llevaron un artefacto que ellos habían diseñado y probado. Le dijeron que no era perfecto y le pidieron consejo. Quien tanto había hecho por los frenos de tren de aire comprimido sin duda sabría, si es que alguien podía saberlo, cómo encerrar el aire en unos cilindros que acaso sustituirían a las ballestas de los automóviles. El señor Westinghouse compró la gestión del invento y se puso manos a la obra para perfeccionarlo. Tras sellar el cilindro con aceite, ideó e introdujo una pequeña bomba automática para mantener el aceite en los lugares adecuados. Al cabo de no muchos meses sacó el invento al mercado listo para la temporada de 1912.»

La transformación de la basura

«El más fantástico cuento de *Las mil y una noches* no despierta más asombro que las hazañas realizadas por el ingeniero químico alemán con los desperdicios (*véase la ilustración*). Para los germanos, un montón de basura constituye una especie de mina de oro. El ingeniero ha puesto de manifiesto la verdad del dicho de Lord Palmerston: “La porquería no es sino materia en un lugar indebido”. Fueron los alemanes quienes nos enseñaron a aprovechar los subproductos de los altos hornos. Un interesante ejemplo de la economía industrial de esa nación es la fabricación de briquetas con el hollín de las salidas de humos de las fundiciones de hierro, material rico en coque y mena de hierro.»



El ingeniero químico, concentrado en su trabajo, trata de averiguar el modo de sacar provecho de la basura, 1912.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVI, Nº 24; 15 DE JUNIO DE 1912



Junio 1862

Un ingenio distinto

«En la Exposición de Londres, otro curioso instrumento es la gran máquina calculadora del señor Babbage, que resuelve ecuaciones de segundo grado y calcula logaritmos con siete cifras. El relato que sobre este invento escribió la difunta Lady Lovelace, hija de Lord Byron, llevó a los Sres. Scheutz, de Estocolmo, a perfeccionarlo. Esa mejora fue adquirida de inmediato por el Gobierno inglés, aunque la máquina no se muestra en la exposición porque está muy ocupada día y noche en Somerset House, confeccionando anualidades y otras tablas para el Registro Civil.»

Mares de carne

«Hace poco se acercó a la costa de Whiteness, en la isla de Shetland, una bandada de ballenas que, tras haber entrado en aguas someras, los isleños capturaron en gran número, se dice que cuatrocientas. Los animales se vieron atacados por el mar y desde tierra; casi toda la manada fue capturada. Acudió gente desde kilómetros a la redonda, y hombres armados con rifles llegaron a toda prisa para disfrutar del nuevo deporte de disparar a las ballenas.»

Pimienta para los soldados

«Un caballero que habló con algunos de los soldados heridos que llegaron hace pocos días desde Newbern afirma que, según le dijeron, la pimienta sería uno de los mejores regalos que podrían enviarles los amigos. Los pasteles y las tartas resultan tan perjudiciales que muchos generales prohíben comerlos, pero la pimienta es un magnífico protector contra la diarrea, trastorno que está dejando sin fuerzas a numerosos soldados en esa región más cálida. La pimienta se introduce en cajitas de latón de unos cien o doscientos gramos de capacidad; los soldados abren un agujero en un extremo y obtienen así un espolvoreador de pimienta.»





NEUROCIENCIAS

Borrado de memorias dolorosas

Jerry Adler

Nuevas terapias, conductuales o farmacológicas, podrían atenuar o eliminar la impronta cáustica de un recuerdo traumático.

FÍSICA CUÁNTICA

Bucles, árboles y la búsqueda de la nueva física

Zvi Bern, Lance J. Dixon y David A. Kosower

Quizá la unificación de las fuerzas de la naturaleza no resulte tan difícil como se pensaba.

SELECCIÓN ESPECIAL

Noveles y nóbeles en física

El 62º encuentro entre jóvenes investigadores y premios Nobel tendrá lugar en Lindau a comienzos de julio. Lo celebramos con la reedición de una serie de textos publicados en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA por algunos de los laureados.



METEOROLOGÍA

Huracán a la vista

Jane Lubchenco y Jack Hayes

El desarrollo de técnicas que permitan dar la alerta de tornados y huracanes con mayor antelación podrá salvar cada año centenares de vidas.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Lorenzo: *El origen del género* Homo; Tanja Sachse: *El futuro de la energía eólica y Rayos X para escudriñar el nanocosmos*; M.ª José Báguena: *Polio: último acto* y *La vacuna de la guerra fría*; Tomás Ortín: *Gravedad cuántica en dos dimensiones espaciales*; Núria Estapé: *El cerebro sometido a tensión*; Juan Pedro Adrados: *Destino: la Luna*; Bruno Moreno: *Apuntes y Se acabó estudiar en el último minuto*; Sara Arganda: *La morfogénesis según Alan Turing*; Alberto Ramos: *La teoría del electrón cumple 120 años*; Xavier Roqué: Vanitas *zoológica*; Luis Bou: *Lo que la ciencia quiere saber*; Maria Rosa Vallès: *Pepinillos en vinagre*; Raquel Santamarta: *Relojes de sol en Mercurio y la Tierra*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España